

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ POLARIZOVANÉHO SVĚTLA NA
VÝSTUPU OPTOVLÁKNOVÉHO SENZORU**

MEASUREMENT OF POLARIZED LIGHT PROPERTIES ON THE OPTICAL FIBER SENSOR OUTPUT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Velič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2020

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Ladislav Velič

ID: 186230

Ročník: 2

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu měření optického výkonu s důrazem na známé metody měření výkonu polarizovaného světla šířícího se optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Práce se zabývá možnostmi měření optického výkonu pro každou rovinu šíření zvlášť. Současné měření okamžitého stavu polarizace a velmi přesné měření vlnové délky umožní získat potřebné informace o nelineárních jevech probíhajících v optickém vlákně. Součástí práce je návrh měřícího pracoviště a jeho realizace.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Filka, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[2] Kyselák, M., Dvořák, F., Maschke, J., Vlček, Č. Sensitivity and dynamic phase response to thermal radiation of a polarization-maintaining fiber. Optica Applicata, 2018, vol. vol. 48, no. 2, p. 249-261. ISSN 0078-5466.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práca obsahuje teóriu polarizácie svetla, rôzne spôsoby akými vzniká a jej praktická aplikácia. Následne sa zaoberá typmi optických vlákien, kde sú popísané vlákna, ktoré využívame v našej práci a to sú vlákna, ktoré zachovávajú polarizáciu. Teória tiež obsahuje popis zobrazenia polarizácie pomocou Poincarého sféry a Stokesových vektorov. Praktická časť sa venuje overeniu zmien parametrov na senzorickom vlákne pri zmenách teploty v jeho okolí a grafické znázornenie hodnôt do grafov získaných pomocou polarimetru a merača výkonu. Záver práce obsahuje diskusiu nad nameranými hodnotami a vyhodnotenie nášho merania.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

dvojlom, DOP, polarizácia, Poincarého sféra, Stokesove parametry, SOP, optický výkon, senzorické vlákno, PM vlákno, polaroid, polarimeter

ABSTRACT

Master's thesis contains the theory of polarized light, different ways of how polarization occurs and its practical applications. Furthermore it describes the types of optical fibres that we are using in our thesis which are fibres, that can maintain the polarization, so called polarization-maintaining fibres. Theory furthermore deals with understanding of displaying polarization with help of Poincaré sphere and Stokes vectors. Practical part of the thesis deals with the observation of the changes of parameters on the sensoric fiber when there is change of temperature in surroundings of the fiber and graphical representation of the values into graphs collected with polarimeter and power meter. In the conclusion there is discussion over the measured values and evaluation of the measurement.

KEYWORDS

birefringance, degree of polarization, polarization, Stokes vectors, Poincaré sphere, state of polarization, optical power, sensoric fibre, polarization-maintaining fiber, polaroid, polarimeter

VELIČ, Ladislav. *Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru*. Brno, 2020, 60 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Měření vlastností polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval vedúcemu svojej práce pánovi prof. Ing. Miloslav Filka CSc. a konzultantovi Ing. Martin Kyselák, Ph.D.za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Obsah

1	Úvod	11
2	Polarizácia svetla	12
2.1	Definícia svetla	12
2.2	Druhy polarizácie	13
2.3	Spôsoby polarizácie svetla	14
2.3.1	Polarizácia polaroidom	14
2.3.2	Polarizácia lomom	15
2.3.3	Polarizácia dvojlomom	15
2.3.4	Polarizácia odrazom	15
2.4	Využitie polarizácie	17
3	Typy optických vlákien	18
3.1	PM vlákna - vlákna zachovávajúce polarizáciu	18
3.1.1	Optické vlastnosti PM vlákien	19
3.1.2	Druhy PM vlákien a ich štruktúra	20
4	Možnosti zobrazenia polarizácie svetla	22
4.1	Polarizačná elipsa	22
4.2	Poincarého sféra	22
4.2.1	Degeneračné stavy Poincarého sféry	24
4.3	Stokesove parametre	25
4.3.1	Odôvodnenie Stokesových polarizačných parametrov	25
4.3.2	Stokesove vektory pre degenerované stavy	26
4.3.3	Stupeň polarizácie	27
4.4	Známe metódy merania optického výkonu	28
4.4.1	Meracie prístroje optického výkonu	28
5	Návrh pracoviska a jeho realizácia	30
5.1	Popis použitých komponentov	30
5.1.1	Laserová dióda LPS-1550-FC	30
5.1.2	Použité PM vlákno a spoje	31
5.1.3	Polarimeter PAX5710	31
5.1.4	Optovláknový senzor	32
5.1.5	Lineárny polarizátor ILP1550PM-FC	33
5.1.6	Delič výkonu	33
5.1.7	Fotodióda	34
5.1.8	Merač optického výkonu VEGA	34

5.2	Návrh pracoviska s polarimetrom	35
5.3	Návrh zapojenia z fotodiódou a polarimetrom	35
6	Praktická realizácia navrhnutého merania	37
6.1	Referenčné meranie	37
6.1.1	Analýza nameraných výsledkov	38
6.1.2	Porovnanie výsledkov referenčného merania	40
6.2	Meranie pri teplote vody v kádinke 0 °C	41
6.2.1	Porovnanie výsledkov merania pri teplote vody 0 °C	44
6.3	Meranie pri teplote vody v kádinke 48 °C	44
6.3.1	Porovnanie výsledkov merania pri teplote vody 48 °C	47
6.4	Meranie na merači optického výkonu	48
7	Diskusia nad nameranými výsledkami	50
7.1	Stokesov vektor S_1 pri rôznych teplotách merania	50
7.2	Stokesov vektor S_2 pri rôznych teplotách merania	51
7.3	Stokesov vektor S_3 pri rôznych teplotách merania	52
7.4	DOP pri rôznych teplotách merania	53
8	Záver	54
	Literatúra	55
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	57
	Zoznam príloh	58
A	Fotky pracoviska	59
B	Obsah priloženej elektronickej prílohy	60

Zoznam obrázkov

2.1	Znázornenie šírenia svetla	12
2.2	Obrázok nepolarizovaného (a)/ polarizovaného svetla (b)	12
2.3	Premena nepolarizovaného svetla na polarizované pomocou polaroidu	14
2.4	Ukážka dvojlomu v anizotropnom kryštále	15
2.5	Zobrazenie odrazu svetelného lúča na rozhraní dvoch prostredí	16
3.1	Zobrazenie rýchlej a pomalej osy vo vlákne	19
3.2	Obrázok štruktúry PM vlákien PANDA a BOW-tie (Motýlik)	20
3.3	Obrázok štruktúry eliptického vlákna	21
4.1	Polarizačná elipsa	22
4.2	Poincarého sféra (guľa)	23
4.3	Stavy polarizácie na Poincarého sfére	24
4.4	Degeneračné stavy na Poincarého sfére	25
5.1	Laserová dióda	30
5.2	Teplotný regulátor CLD1010LP	31
5.3	Princíp polarimetru	32
5.4	Polarimeter PAX5710	32
5.5	Usadenie optovláknového senzoru	32
5.6	Nákres lineárneho polarizátora ILP1550PM-FC	33
5.7	Nákres deliča výkonu PMC1550-90B-FC	33
5.8	Merač optického výkonu VEGA	34
5.9	Schéma navrhovaného pracoviska	35
5.10	Schéma navrhovaného pracoviska s fotodiódou	36
6.1	Praktická realizácia merania	37
6.2	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesoveho vektoru S_1	38
6.3	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_2	39
6.4	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3	39
6.5	Znázornenie stupňa polarizácie DOP	40
6.6	Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote 24 °C	41
6.7	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_1	41
6.8	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_2	42
6.9	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3	43
6.10	Znázornenie stupňa polarizácie DOP	43
6.11	Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote vody 0 °C	44
6.12	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_1	45
6.13	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_2	45
6.14	Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3	46
6.15	Znázornenie stupňa polarizácie DOP	47

6.16	Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote 48 °C	48
6.17	Nameraný optický výkon pri teplote 0 °C	48
6.18	Nameraný optický výkon pri teplote 24 °C	49
6.19	Nameraný optický výkon pri teplote 48 °C	49
7.1	Graf Stokesovho vektoru S_1 pri rôznych teplotách merania	50
7.2	Graf Stokesovho vektoru S_2 pri rôznych teplotách merania	51
7.3	Graf Stokesovho vektoru S_3 pri rôznych teplotách merania	52
7.4	Graf DOP pre rôzne teploty vody	53
A.1	Uloženie optovláknového senzoru	59
A.2	Fotka pracoviska	59

Zoznam tabuliek

5.1	Tabuľka porovnania navrhovaných fotodiód	34
-----	--	----

1 Úvod

Cieľom diplomovej práce je analýza spôsobu merania optického výkonu s dôrazom na známe metódy merania výkonu polarizovaného svetla šíriacim sa optickým vláknom dvoma polarizačnými rovinami. V práci sa venujeme sledovaním zmeny chovania parametrov senzorického vlákna pri zmene teplotných podmienok v jeho okolí. Práca sa zaoberá možnosťami merania optického výkonu pre každú rovinu šírenia zvlášť. Súčasné meranie okamžitého stavu polarizácie a veľmi presné merania vlnovej dĺžky umožnia získať potrebné informácie o nelineárnych javoch v optickom vlákne.

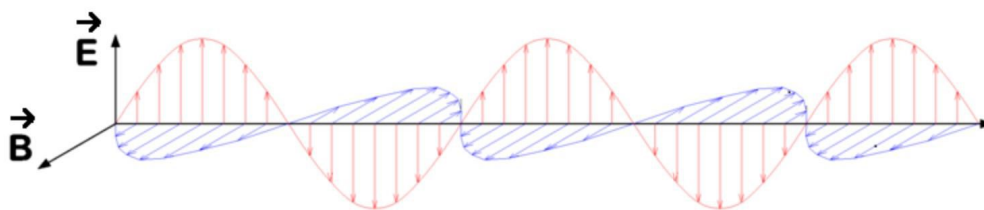
V úvode diplomovej práce sú základné poznatky o polarizácii svetla, druhy a spôsoby polarizácie, ako aj jej využitie v praxi. Na túto tému naväzuje popísanie optických vlákien zachovávajúce polarizáciu, PM vlákna, kde sú popísané rôzne spôsoby výroby týchto vlákien, ich štruktúra a 3 rôzne druhy týchto PM vlákien. Následujúca časť sa zaoberá Poincarého sférou (gulou), na ktorej sa dajú presne zobrazovať stavy a premeny polarizovaného svetla, ako aj jeho degeneračné stavy. Ďalšia kapitola sa venuje Stokesovým vektorom, ich definícií a vysvetlením ako pomocou týchto parametrov vektorov v praktickej časti popisovať rôzne stavy polarizovaného svetla a vyhodnocovať výsledky v praktickej časti. Posledná teoretická časť sa zaoberá známymi metódami merania výkonu, ako aj porovnaním polovodičových detektorov.

Druhá časť diplomovej práce sa venuje praktickej časti, kde sú na začiatku popísané rôzne komponenty využité pri realizácii merania, ďalej návrh rôznych zapojení, z ktorého bolo jedno vybrané na realizáciu v laboratóriu. Praktická realizácia obsahuje tri merania, každé má rovnaké podmienky až na rozdiel od teploty v okolí senzorického vlákna, kde sme prikladali nádobu vody s tromi rôznymi teplotami a sledovali reakciu parametrov na tieto zmeny. Výsledky namerané pomocou polarimetra a merača výkonu sú následne zobrazené v grafoch a v poslednej kapitole zhrnuté v diskusii.

2 Polarizácia svetla

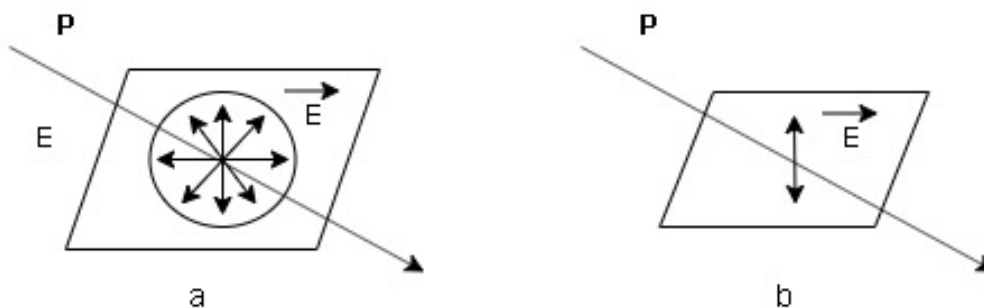
2.1 Definícia svetla

Svetlo je priečne elektromagnetické vlnenie popísané vektorom elektrickej intenzity \vec{E} a vektorom magnetickej indukcie \vec{B} . Vektor elektrickej intenzity \vec{E} je vždy kolmý na smer, ktorým sa vlnenie šíri. Smer kmitania vektoru magnetickej indukcie \vec{B} je kolmý ako na smer šírenia vlnenia, tak na vektor \vec{E} . Vektory \vec{E} a \vec{B} ležia v rovine, ktorá je kolmá na smer šírenia svetla.



Obr. 2.1: Znázornenie šírenia svetla

Pri nepolarizovanom svetle má vektor \vec{E} v danej rovine náhodný smer i veľkosť ako na obrázku 2.2. Ak obmedzíme smer kmitania vektoru \vec{E} (resp. \vec{B}), alebo jeho veľkosť, získame polarizované svetlo, ktoré je pre ľudské oko neodlíšiteľné od nepolarizovaného svetla. U linearizovaného svetla sa rovina, v ktorom ležia kmity vektoru \vec{E} nazýva kmitová rovina. Rovina kolmá na kmitovú rovinu (tj. rovina, v ktorej kmitá vektor \vec{B}) sa nazýva rovina polarizačná [1].



Obr. 2.2: Obrázok nepolarizovaného (a)/ polarizovaného svetla (b)

2.2 Druhy polarizácie

Existujú 3 druhy polarizácie svetla [3]:

1. Lineárne polarizované svetlo : kde kmitá vektor elektrickej intenzity \vec{E} v jednej priamke (vektor má stále rovnaký smer, alebo opačný), to znamená, že amplitúda vektoru \vec{E} sa mení, avšak jeho fáza zostáva rovnaká. Vektor polarizácie by sme mohli vyjadriť vzťahom

$$E_0 = (E_x, E_y, 0), \quad (2.1)$$

pričom aby platilo, že ide o lineárnu polarizáciu, medzi E_x a E_y nesmie byť fázový rozdiel. Celková fáza musí byť zvolená tak, aby čísla E_x a E_y boli reálnymi číslami. Lineárne polarizovaný vektor v smere x (horizontálna os) nastáva pri $E_x \neq 0$ a $E_y = 0$. Podobne vo vertikálnom smere y je svetlo lineárne polarizované ak platí, že $E_y \neq 0$ a $E_x = 0$.

2. Kruhovo polarizované svetlo : konce vektoru \vec{E} opisujú kruh, mení sa smer vektoru, ale jeho veľkosť je konštantná.

Pri kruhovej polarizácii platí, že vektory dvoch vzájomne kolmých lineárne polarizovaných zložiek s rovnakou amplitúdou majú fázový rozdiel $\pm \frac{\pi}{2}$ [2].

Ľavotočivú kruhovú polarizáciu môžeme popísať vzťahom

$$\vec{E} = (E_0 \cos(kz - \omega t), -E_0 \sin(kz - \omega t), 0), \quad (2.2)$$

naopak pravotočivú polarizáciu môžeme vyjadriť následovne

$$\vec{E} = (E_0 \cos(kz - \omega t), E_0 \sin(kz - \omega t), 0). \quad (2.3)$$

3. Elipticky polarizované svetlo : konce vektoru \vec{E} opisujú elipsu (ide o obecný typ polarizácie). V tomto prípade mení vektor \vec{E} svoju veľkosť a aj smer.

Matematicky sa dá obecné elipticky polarizované svetlo popísať vzťahom

$$\vec{E}_0 = E_x x \cos(kz - \omega t) + E_y y \cos(kz - \omega t + \phi). \quad (2.4)$$

Ak sú E_x a E_y odlišné a relatívna fáza $\phi \neq 0$, polarizácia sa mení v amplitúde nakoľko rotuje v x-y rovine. Takáto rotácia opisuje elipsu, preto ju označujeme ako eliptickú polarizáciu. Lineárna polarizácia je podľa tohto vzťahu vyjadrená pre $\phi = 0$, kruhová polarizácia pre $\phi = \frac{\pi}{2}$ a $E_x = E_y$.

2.3 Spôsoby polarizácie svetla

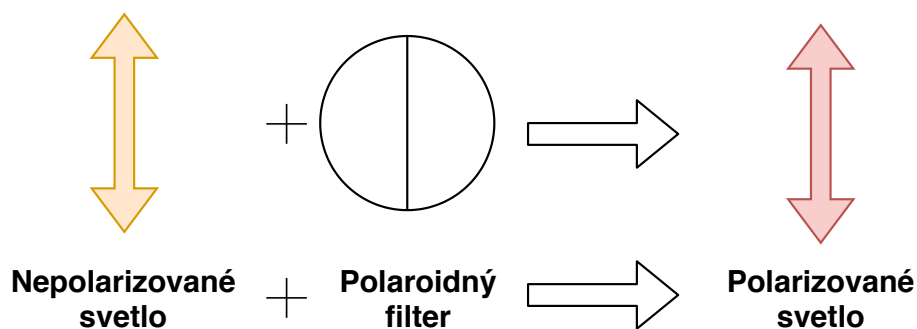
Nepolarizované svetlo môžeme premeniť na svetlo polarizované týmito spôsobmi [1]

- polarizácia polaroidom
- polarizácia lomom
- polarizácia dvojlomom
- polarizácia odrazom

2.3.1 Polarizácia polaroidom

Polaroidy sa používajú k výberu špecifickej polarizácii svetla. Najbežnejšie delíme polaroidy na reflektívne, dichroické a dvojlomné (birefrigent). Tieto druhy polarizácií sú popísané v nasledujúcich kapitolách.

Polarizácia polarizačným filtrom (polaroidom) je najčastejšia metóda polarizácie. Polarizačné filtry sú vyrobené zo špeciálneho materiálu, ktorý je schopný filtrovať svetlo prechádzajúce cez filter z nepolarizovaného na polarizované. Jednoduchý postup môžeme vidieť na obr. 2.3. Táto schopnosť vzniká kvôli chemickému zloženiu materiálu filtra. Filter obsahuje molekuly s dlhou reťazovou štruktúrou, ktoré sú zarovnané vo filtri do rovnakého smeru (vertikálne alebo horizontálne). Počas výroby filtra sú tieto molekuly natiahnuté po celom filtri tak, že každá molekula je zarovnaná rovnobežne s ich osami. Toto zarovnanie vytvorí vo filtri polarizačnú os po celej dĺžke filtra. Pri vstupe nepolarizovaného svetla do filtra je pri vertikálnom zarovnaní molekúl polarizovaná os zarovnaná horizontálne, to znamená, že budú prepustené len tie elektromagnetické vlny, ktoré sú paralelné s polarizačnou osou. Pre filter so zarovnanou osou horizontálne platí opačná logika, tj. že budú prepustené len elektromagnetické vlny paralelné s vertikálnou osou. Elektromagnetické vlny kolmé na polarizačnú os budú filtrované úplne.



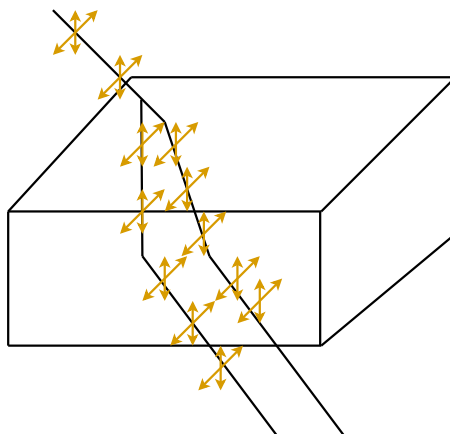
Obr. 2.3: Premena nepolarizovaného svetla na polarizované pomocou polaroidu

2.3.2 Polarizácia lomom

Pri lome svetla dochádza podobne ako pri odraze k čiastočnej polarizácii. Rozdielom je, že pri lome svetla dochádza vždy k neúplnej polarizácii.

2.3.3 Polarizácia dvojlomom

K polarizácii dvojlomom dochádza pri špeciálnych anizotropných kryštáloch (napr. islandský vápenec). Optické vlastnosti anizotropných látok sú závislé na smere prichádzajúceho lúča. Pri dopade svetla na takéto kryštály dochádza k lomu na dva rôzne lúče (dvojlom). Jeden lúč nazývaný ako riadny lúč (riadiaci sa zákonom lomu, jeho index lomu nezávisí na smere). Druhý lúč nazývaný tiež ako mimoriadny lúč, jeho index lomu nie je konštantný, ale závisí na uhle, pod akým mimoriadny lúč prechádza cez prostredie. Oba tieto lúče sú lineárne polarizované a ich vektory \vec{E} sú na seba kolmé.



Obr. 2.4: Ukážka dvojlomu v anizotropnom kryštále

2.3.4 Polarizácia odrazom

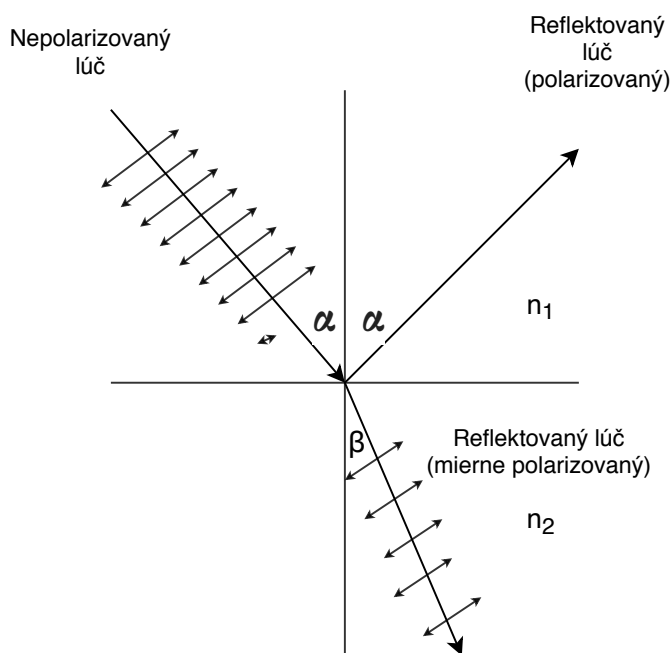
V prípade dopadu nepolarizovaného svetla na rozhranie dvoch prostredí pod určitým uhlom α funguje polarizácia tak, že v odrazenom svetle kmitá \vec{E} v kmitovej rovine prevažne kolmo k rovine dopadu. Polarizácia odrazeného svetla je len čiastočná a závisí na uhle dopadu svetla. K úplnej polarizácii odrazeného svetla dochádza iba pri určitom uhle dopadu, ktorý závisí na indexu lomu uvažovaných dvoch prostredí. Tento jav nastáva pri uhle dopadu, ktorý sa nazýva Brewsterov uhol dopadu. Na rozhraní dvoch opticky rôznych nevodivých prostredí dochádza k úplnému prechodu

polarizovaného svetla do druhého prostredia bez akéhokoľvek odrazu. Prechod svetelného lúča z jedného optického prostredia do druhého popisuje Snellov zákon lomu [4]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.5)$$

kde pomer sinusu uhlu dopadu a sinus uhlu lomu svetelného lúča je rovný pomeru indexov lomov daných optických prostredí, zobrazené na obr. 2.5.

Vo všeobecnosti platí, že s narastajúcim uhlom dopadu sa znižuje intenzita prechádzajúceho lúča a zvyšuje sa intenzita odrazeného svetla. Pre veľké uhly dopadu sa pomerne väčšina dopadnutého svetla odráža od rozhrania dvoch prostredí.



Obr. 2.5: Zobrazenie odrazu svetelného lúča na rozhraní dvoch prostredí

Polarizácia odrazom sa využíva najmä v lineárnom polaroide. Nepolarizované svetlo môžeme vnímať ako veľmi rýchlo sa meniacu kombináciu p- a s- polarizovaného svetla. Ideálny lineárny polarizátor prepustí len jednu z dvoch lineárnych polarizácií, pričom redukuje počiatočnú nepolarizovanú intenzitu I_0 o polovicu

$$I_0 = \frac{I_0}{2}. \quad (2.6)$$

Pre lineárne polarizované svetlo s intenzitou I_0 je celková intenzita prepustená cez ideálny polarizátor popísaná Malusovým zákonom

$$I = I_0(\cos)^2\phi, \quad (2.7)$$

kde ϕ je uhol medzi dopadajúcou lineárnou polarizáciou a polarizačnou osou. Pre paralelné osy sa prepúšťa 100% svetla, pričom pre kolmé osy (90° uhol) nastáva 0 % prepustnosť [5]:.

2.4 Využitie polarizácie

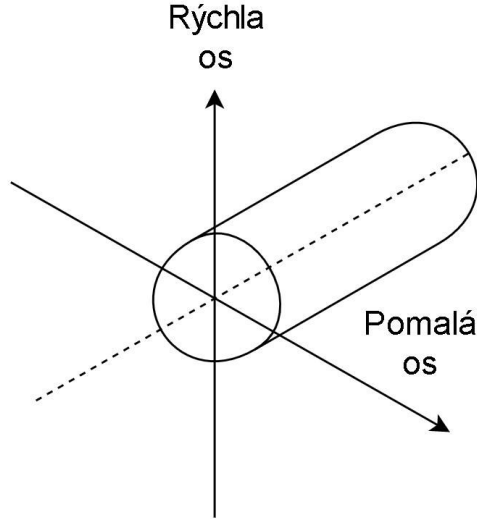
- Polaroidy
- polarimetria (veda, ktorá skúma opticky aktívne látky)
- Fotoelasticimetria (metóda skúmania mechanických napätí v rôznych objektoch)
- LCD displeje a zobrazovače
- Laserové diódy
- Polarizačné filtre
- 3D kiná

3 Typy optických vlákien

Pomerne známe optické vlákna rozdeľujeme podľa technológie druhu prenosu na jednovidové a mnohovidové s konštantným lomom jadra a plášťa, alebo na gradientné s premenným indexom lomu. Jednovidové svetlovody vykazujú menšiu disperziu a sú vhodnejšie pre prenosy na dlhšie vzdialenosti. Mnohovidové svetlovody sa nemôžu využívať na dlhšie prenosy, nakoľko u nich vzniká vlnová disperzia, ktorá obmedzuje šírku pásma. Gradientné vlákno vďaka zmene indexu lomu n v priereze jadra od priečného smeru dokáže znížiť na polovicu počtu vidov vo vlákne, čo sa odráža na kvalite prenášaného signálu [6]. V týchto typoch vlákien ale dochádza k dvojlomu kvôli faktu, že pri ich výrobe je vždy prítomný mechanický stres alebo iné poškodenie, ktoré ruší symetriu vlákna. Dvojlomnosť je vlastnosť optických anizotropných a transparentných materiálov. Často vzniká dvojlomnosť aj pri izotropných materiáloch vďaka mechanickému poškodeniu, popr. vložení materiálu do silného elektrického poľa [7]. Oba tieto príklady rušia pôvodnú symetriu, vďaka čomu vzniká medzi dvoma polarizačnými rovinami vo vlákne polarizačný presluch (tzv. polarization crosstalk). Výstupný polarizačný stav je náhodný a mení sa v čase. Polarizácia vo vlákne sa taktiež mení prípadným ohnutím vlákna alebo zmenou teploty, čo je pre náš účel nedostačujúce.

3.1 PM vlákna - vlákna zachovávajúce polarizáciu

Vlákna zachovávajúce polarizáciu (tkz. PM vlákna – Polarization-maintaining fibres) sú typom jednovidových optických vlákien. Na rozdiel od normálnych jednovidových vlákien, ktoré prenášajú polarizované svetlo nekontrolovaným spôsobom (náhodne), sú PM vlákna navrhnuté na propagáciu len jednej polarizácie privedeného optického signálu [8]. Udržanie polarizácie je veľmi dôležité pre niektoré optické komponenty (napr. elektro-optické modulátory, vláknové senzory a lasery), ktoré vyžadujú vstup polarizovaného optického svetla a sú veľmi citlivé na straty pri polarizácií PDL (Polarization-dependent loss). Tento problém vedia vyriešiť PM vlákna. Do týchto vlákien je zámerne zavedený lineárny dvojlom, takže sa v ňom šíria dve rôzne definované vidy, ktoré majú odlišné fázové rýchlosti. Pokiaľ je privolaný optický signál zarovnaný s jednou z dvojlomných osí (pomalou alebo rýchlou osou), tento stav polarizácie bude zachovaný v PM vlákne po celej jeho dĺžke a to aj pri jeho ohnutí (viz. obr. 3.1). Na rozdiel od normálnych optických vlákien, ak dôjde v PM vláknach ku náhodnému presluchu medzi dvoma rôznymi polarizačnými stavmi, tak vďaka odlišnej fázovej rýchlosti budú navzájom zrušené, čím bude zachovaná polarizácia.



Obr. 3.1: Zobrazenie rýchlej a pomalej osy vo vlákne

V praxi sa rozlišujú PM vlákna na vlákna HIBI s veľkým dvojlomom (tkz. high-birefringence fibers) a LoBI s malým dvojlomom (low-birefringence fibers). HIBI vlákna majú odlišný index lomu pozdĺžne každej kolmej osy (rýchla a pomalá os). Vďaka veľkému rozdielu indexu lomu os si zachováva polarizačný stav aj pri teplotnej zmene, či pri fyzickej manipulácii (pohyb alebo ohyb vlákna) a znižuje sa pravdepodobnosť polarizačného presluchu (polarization crosstalk).

Naopak LoBI vlákna sú na rozdiel od HIBI vlákien cenovo dostupnejšie, ale nie sú tak odolné voči okolitým vplyvom ako je zmena teploty a vibrácie v okolí. Pre naše účely budeme využívať HIBI PM vlákno [10].

3.1.1 Optické vlastnosti PM vlákien

- Dvojlomnosť (modal birefringence): Rozdiel propagačných konštánt $\Delta\beta$ medzi dvoma polarizačnými rovinami sa nazýva modulárna dvojlomnosť a je vyjadrená vzťahom

$$B_m = \frac{\Delta\beta}{k_0}, \quad (3.1)$$

kde $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ (λ_0 je vlnová dĺžka vo vákuu). Vysoká dvojlomnosť znižuje polarizačný presluch, čím zvyšuje schopnosť zachovania polarizácie. PM vlákna majú zvyčajne hodnotu modálnej dvojlomnosti väčšiu ako 10^{-4} .

- Fázová dĺžka: ako sme už spomínali, dve polarizačné roviny majú rôznu propagačnú konštantu v PM vláknoch. Fázová dĺžka (beat length) je dĺžka, kedy rozdiel fázy vo vlákne dosiahne hodnotu 2π , popísaná vzťahom :

$$L_b(m) = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda_0}{B_m}. \quad (3.2)$$

Fázová dĺžka je inverzne proporcionálna ku dvojlomnosti, tzn. čím je väčšia dvojlomnosť, tým je kratšia fázová dĺžka a naopak.

- Polarizačný presluch: je pomer lineárne polarizovaného svetla (zarovnaného buď na rýchlu alebo pomalú os vlákna) a na neho kolmý polarizačný vid, matematicky vyjadrený rovnicou

$$\text{presluch (dB)} = 10 \log \frac{P_y}{P_x}, \quad (3.3)$$

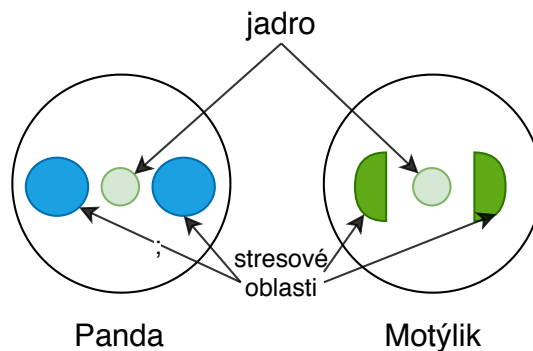
kde P_y a P_x sú veľkosti svetla v rýchlej, resp. pomalej osy. Čím je dvojlomnosť väčšia, tým je polarizačný presluch menší a tým je lepšia zachovaná polarizácia [9].

3.1.2 Druhy PM vlákien a ich štruktúra

Poznáme tri typy PM vlákien, ktoré získavajú vlastnosti vlákna pomocou špeciálnej výroby:

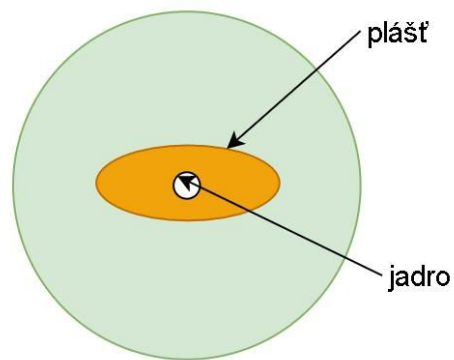
1. PANDA
2. Bow-tie (Motýlik)
3. Eliptické vlákno (elliptical-cled)

PANDA (Polarization-maintaining and absorption reducing) a Bow-tie využívajú pre výrobu stresovú dvojlomnosť, ktorá je vo vlákne termálne indukovaná. Vlákno má v sebe dve stresové oblasti (tyčinky), ktoré sú umiestnené na oboch stranách jadra a ich koeficient termálnej rozpínavosti je odlišný od zvyšku vlákna. Tieto stresové miesta menia objem v inej intenzite v porovnaní s inými časťami vlákna pri vychladení na teplotu miestnosti, čím sa indukuje väčší stres v jadre vlákna [11].



Obr. 3.2: Obrázok štruktúry PM vlákien PANDA a BOW-tie (Motýlik)

Pri eliptickom vlákne (elliptical cled) sa využíva jeho geometricky asymetrická štruktúra vlákna, ktorá má refrakčný index profilu, ktorý vedie k zvýšeniu stresovej dvojlomnosti (viz. 3.3).



Obr. 3.3: Obrázok štruktúry eliptického vlákna

4 Možnosti zobrazenia polarizácie svetla

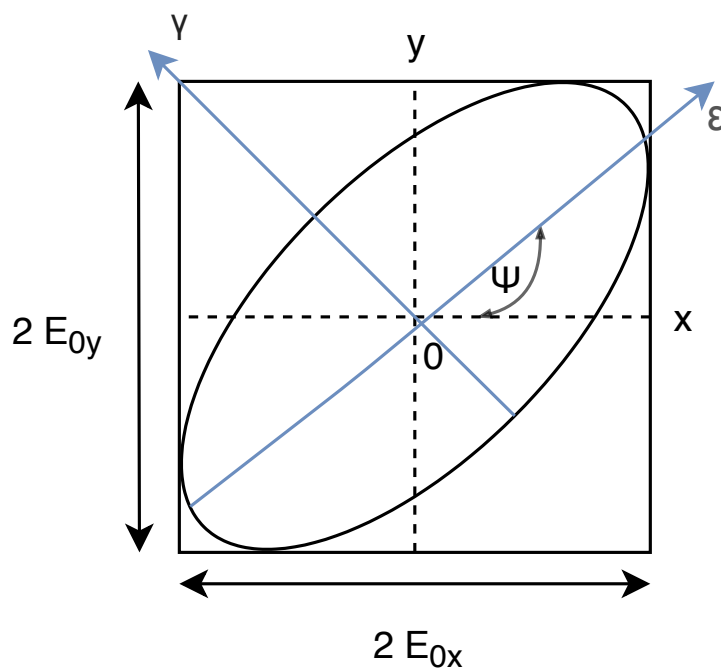
4.1 Polarizačná elipsa

V prípade ak vektor intenzity elektrického pola \vec{E} meniaci sa v čase t opisuje elipsu, vzniká tzv. polarizačná elipsa. Podľa Fresnelovej vlnovej teórie $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ popisujú vzájomnú osciláciu v rovinách $x - y - z$ a $y - z$. V rovnici elipsy sa nepočíta s použitím časového priestoru $\omega t - kz$, následne má rovnica tvar [4]

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)E_y(z, t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta, \quad (4.1)$$

kde $\delta = \delta_y - \delta_x$.

Zložky $E_x(z, t)$ a $E_y(z, t)$ sú závislé na čase. Na obr. 4.1 je zobrazený rotačný $\epsilon - \gamma$ súradnicový systém. Kvôli nemeniacim sa amplitúdam E_{0x} a E_{0y} a fázy δ zostáva polarizačná elipsa pevná.

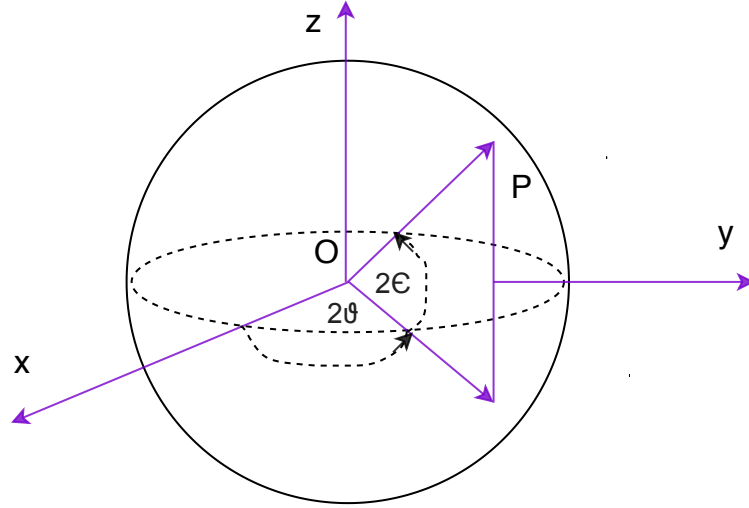


Obr. 4.1: Polarizačná elipsa

4.2 Poincarého sféra

Henri Poincaré v roku 1890 objavil, že polarizovaná elipsa by sa dala reprezentovať na komplexnej rovine. Následne by mohla byť táto rovina premietnutá do gule.

Poincarého guľa je grafické zobrazenie reálneho, trojdimenzionálneho priestoru, pomocou ktorého sa dá popísať polarizované svetlo a premeny polarizácie vyvolané prechodom cez objekty. Každý stav polarizácie môže byť jedinečne reprezentovaný bodom na alebo vnútri gule vycentrovanej na obdĺžnikovom xyz koordinačnom systéme ako je možné vidieť na obr. 4.2 [12]



Obr. 4.2: Poincarého sféra (guľa)

Koordináty x, y, z bodu sú normalizované Stokesove parametre (S_1, S_2, S_3) popisujúce stav polarizácie. ϵ je uhol sférickej orientácie a θ je uhol eliptickej orientácie, pričom bod P je bod na povrchu sféry. Popis bodu kartézskych koordinátov ku sférickým koordinátom pre jednotkovú rovnicu popisujú rovnice 4.2, 4.3, 4.4

$$x = \cos(2\epsilon) \cos(2\theta), 0 \leq \theta < \pi, \quad (4.2)$$

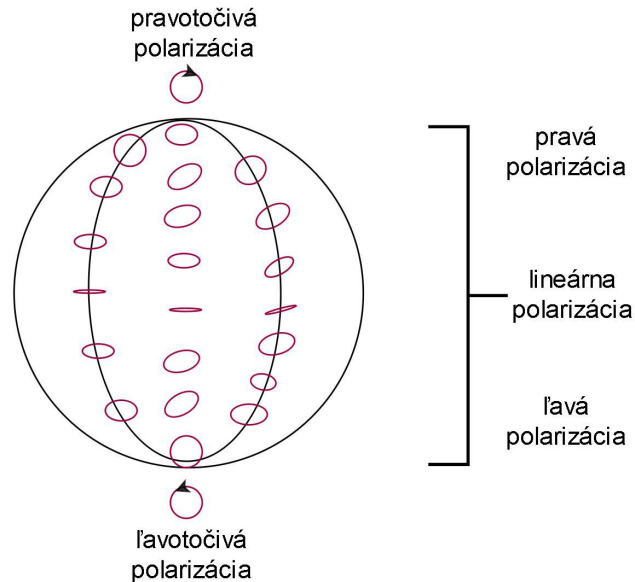
$$y = \cos(2\epsilon) \sin(2\theta), -\pi/4 < \epsilon \leq \pi/4, \quad (4.3)$$

$$z = \sin(2\epsilon), \quad (4.4)$$

kde $x^2 + y^2 + z^2 = 1$, pre jednotkovú kružnicu.

Plne polarizované svetlo, či už lineárne, kruhové, alebo eliptické, je reprezentované bodom na povrchu Poincarého sféry. Čiastočne polarizované svetlo, ktoré môžeme považovať za superpozíciu polarizovaného a nepolarizovaného svetla, je reprezentované bodom v rámci objemu Poincarého sféry. Vzdialenosť bodu od centra sféry udáva stupeň polarizácie svetla. Hodnota sa pohybuje od 0 v centre (nepolarizované svetlo) až po povrch sféry (úplne polarizované svetlo). Stav polarizácie sú na Poincarého sfére zobrazené na obr. 4.3.

- Kruhová polarizácia je zobrazená na póloch, pričom okamžitý eliptický stav sa šíri od rovníka ku pólom.
- Pravá eliptická polarizácia je v severnej hemisfére, ľavá eliptická polarizácia v južnej hemisfére.
- Lineárna polarizácia je zobrazená iba na rovníku.

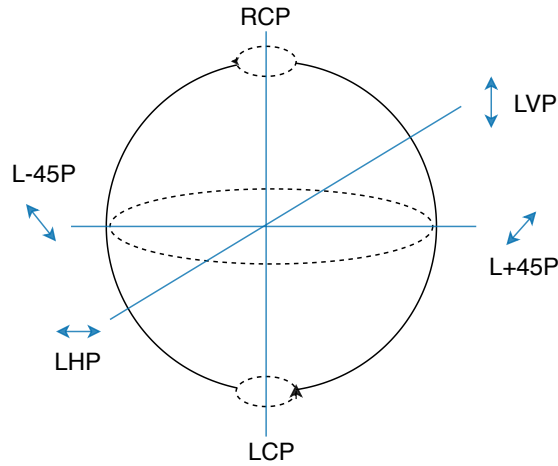


Obr. 4.3: Stavy polarizácie na Poincarého sfére

4.2.1 Degeneračné stavy Poincarého sféry

Z predchádzajúcej rovnice vieme definovať akýkoľvek stav polarizácie pomocou páru koordinátov 2ϵ a 2θ . Degeneračné stavy Poincarého sféry sú zobrazené na obrázku 4.3

- lineárne horizontálne polarizované svetlo LHP(0° , 0°)
- lineárne vertikálne polarizované svetlo LVP(180° , 0°)
- lineárne L-45P polarizované svetlo (270° , 0°)
- lineárne L+45P polarizované svetlo (90° , 0°)
- pravá kruhová polarizácia RCP(0° , 90°)
- ľavá kruhová polarizácia LCP(0° , -90°)



Obr. 4.4: Degeneračné stavy na Poincarého sfére

4.3 Stokesove parametre

V predchádzajúcej kapitole sme popisovali polarizované svetlo pomocou Poincarého sféry spolu s polarizačnou elipsou. Táto metóda však má 2 hlavné obmedzenia. Svetlo má veľmi vysokú frekvenciu a doba trvania jednej vibrácie je v rádoch 10^{-15} sekundy, čo je zložité na odmeranie. Druhým problémom je, že polarizačná elipsa dokáže popísať iba plne polarizované svetlo. Väčšina svetla je ale len čiastočne polarizovaná. V roku 1852 Sir George Gabriel Stokes prišiel na spôsob, ktorým sa dá každý stav polarizovaného svetla popísať pomocou 4 merateľných parametrov [13]

1. S_0 – celková intenzita svetla (polarizovaná+nepolarizovaná).
2. S_1 – intenzita lineárne horizontálnej alebo vertikálnej polarizácie.
3. S_2 – intenzita lineárnej $+45^\circ$ alebo -45° polarizácie.
4. S_3 – intenzita pravo/ľavo kruhovej polarizácie.

Intenzita polarizovanej časti svetelnej vlny je definovaná rovnicou 4.5

$$I_{\text{polarizované}} = \sqrt{(S_1)^2 + (S_2)^2 + (S_3)^2}. \quad (4.5)$$

4.3.1 Odôvodnenie Stokesových polarizačných parametrov

Povedzme, že máme dve roviny svetla, ktoré sú na seba kolmé v ľubovoľnom bode v priestore (x, y, z) . Pre zjednodušenie a bez straty všeobecnosti môžeme určiť $z=0$. Tieto dve vlny môžeme následne opísať rovnicami [14]

$$E_x(t) = E_{0x}(t) \cos[\omega t + \delta_x(t)], \quad (4.6)$$

$$E_y(t) = E_{0y}(t) \cos[\omega t + \delta_y(t)], \quad (4.7)$$

kde $E_{0x}(t)$, $E_{0y}(t)$ sú okamžité amplitúdy, ω je okamžitá uhlová frekvencia a $\delta_x(t)$, $\delta_y(t)$ sú okamžité fázy.

Ako sme spomínali v kapitole 1.7, vibrácie svetla sú v rámci 10^{-15} sekundy, pozorovací čas môžeme považovať za nekonečný. Nakoľko sú $E_{0x}(t)$ a $E_{0y}(t)$ obe periodické, môžeme popísať prvú rovnicu 4.6 a 4.7 ako priemer jednej oscilačnej doby pomocou vzťahu

$$E_x(t)E_{0x}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_x(t)E_{0x}(t)dt, \quad (4.8)$$

kde T je celkový priemerný čas.

Parametre S_0 , S_1 , S_2 a S_3 sú časovo spriemerované cez časový interval T a definované týmito vzťahmi

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2, \\ S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2, \\ S_2 &= 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta, \\ S_3 &= 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta, \end{aligned}$$

kde $\delta = \delta_x - \delta_y$.

Prvý Stokesov parameter S_0 popisuje celkovú intenzitu optického žiarenia. druhý Stokesov parameter S_1 popisuje prevahu LHP svetla nad LVP svetla, tretí Stokesov parameter S_2 popisuje prevahu L+45P svetla nad L-45P svetla a posledný štvrtý Stokesov parameter S_3 popisuje prevahu RCP svetla nad LCP svetlom.

Pre elipticky polarizované svetlo sú Stokesove parametre vhodné usporiadať do matice nazývanej Stokesove vektory pre elipticky polarizované svetlo. Matica vyzerá nasledovne

$$S = \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

4.3.2 Stokesove vektory pre degenerované stavy

Z uvedených definícií a rovníc z kapitoly 4.3.1 môžeme určiť Stokesove stavy pomocou matíc

$$S_{LHP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{LVP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{L+45P} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4.10)$$

$$S_{L-45P} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, S_{RCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, S_{LCP} = I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (4.11)$$

kde I_0 je intenzita svetla. Pri pravotočivej kruhovej polarizácii RCP sa hodnoty $E_{0x} = E_{0y}$, $\delta = \frac{\pi}{2}$, pričom pri lavotočivej kruhovej polarizácii LCP sa $E_{0x} = E_{0y}$, $\delta = \frac{3\pi}{2}$. Smery Stokesových parametrov sú zobrazené na obr. 4.3.

4.3.3 Stupeň polarizácie

Stupeň polarizácie DOP (Degree of polarization) P sa dá definovať pomocou Stokesových parametrov touto rovnicou

$$P = \frac{I_{\text{polarizované}}}{I_{\text{celkové}}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (4.12)$$

kde $I_{\text{polarizované}}$ je intenzita súčtu polarizovaných komponentov a $I_{\text{celkové}}$ je celková intenzita žiarenia. Stupeň polarizácie P môže nadobudnúť tri hodnoty:

1. $P = 0$, nepolarizované svetlo.
2. $P = 1$, plne polarizované svetlo.
3. $0 < P < 1$, čiastočne polarizované svetlo.

Stupeň polarizácie v Poincarého sfére

V Poincarého sfére DOP matematicky predstavuje vzdialenosť troch posledných normalizovaných zložiek Stokesových vektorov od pôvodu, tzn. že stupeň polarizácie sa môže zobrazit realizovaním polarizovaného paprsku v Poincarého sfére. Povrch Poincarého sféry odpovedá $DOP = 100\%$, pričom reprezentuje všetky polarizované stavy. U lineárnej polarizácii platí vzorec

$$DOP_{\text{lin}} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (4.13)$$

a pre kruhovú polarizáciu platí vzorec

$$DOP_{\text{circ}} = \frac{S_3}{S_0}. \quad (4.14)$$

Na základe vzorcov 4.13 a 4.14 môžeme odvodiť celkové DOP vzorcom

$$DOP = \sqrt{(DOP_{\text{lin}})^2 + (DOP_{\text{kruh}})^2}. \quad (4.15)$$

4.4 Známe metódy merania optického výkonu

Optické vlákna predávajú z hľadiska šírenia svetelného žiarenia stratové prostredie. Optický signál je pri prechode optickým vláknom tlmený, merateľnú hodnotu reprezentuje útlm. Útlm môže byť meraný viacerými spôsobmi, napr. priamym meraním (metóda dvoch dĺžok alebo metóda vložených strát) a nepriamym meraním (pomocou optickej reflektometrie OTDR). Pri týchto meraniach je jedným z najzákladnejších meraní práve meranie optického výkonu. Výkon prenášaný žiarením vyjadrujeme výkonom optického žiarenia $P[\text{W}]$. V optoelektronike používame pre meranie optického výkonu L decibely absolútne $[\text{dBm}]$. Úroveň optického výkonu sa vzťahuje k jednému miliwattu

$$L = 10 \log \frac{P[\text{mW}]}{1\text{mW}}. \quad (4.16)$$

Hodnota optického výkonu bude kladná len v prípade, ak je výkon prijímaného signálu väčší ako výkon 1mW . Pri zápornej hodnote výkonu je hodnota vzťahovaná k hodnote 1mW , nejde teda o zápornú hodnotu výkonu, ale len o rozdiel od referenčnej hodnoty. Meranie optického výkonu sa uskutočňuje premenou výkonu svetelného lúču emitovaným priamo zo svetelného zdroja alebo vystupuje z optického vlákna na elektrický signál pomocou optickoelektronického (O/E) konvertoru. Pre získanie presných výsledkov musí byť optický merač výkonu nastavený na rovnakú vlnovú dĺžku ako použité O/E prevodníky, ktoré sú hlavnými prvkami zdrojov a prijímačov [15].

4.4.1 Meracie prístroje optického výkonu

Pre meranie optického výkonu sa najčastejšie využívajú polovodičové detektory (fotodiódy), nakoľko sú citlivé na svetlo vo výkonových úrovniach a vlnových dĺžkach používaných v optických vláknach. Poznáme tri najbežnejšie materiály pre výrobu detektorov [16] :

- kremíkové detektory (Si)
- germániové detektory (Ge)
- India-Gallia-Arsenid detektory (InGaAs)

Kremíkové diódy sú citlivé na svetlo v rozmedzí vlnovej dĺžky od 400 nm do 1100 nm . Kremíkové diódy sú nízkošumové, využívajú prúd, ktorý prechádza fotodiódou, na ktorú nedopadá žiadne svetlo. Obvyklá úroveň šumu Si detektorov je od -70 dBm do -90 dBm . Nevýhodou týchto fotodiód je ich nízka kapacitancia, to je schopnosť zbierania a udržiavania energie vo forme elektrického náboja. Nakoľko naše praktické meranie bude vyžarovať svetelné žiarenie na vlnovej dĺžke 1550 nm nebudeme využívať kremíkové fotodiódy.

Germániové detektory sú citlivé na svetlo v rozmedzí vlnovej dĺžky od 800 nm do 1800 nm, čo z nich robí použiteľné fotodiódy pre všetky systémy s optickými vláknami. Pri meraní nižších vlnových dĺžok majú Ge detektory vyšší šum, ktorý je priamo úmerný ploche detektoru. Riešením je použitie menšieho detektoru, avšak aj to má svoju nevýhodu. Je nutné umiestniť koniec vlákna do stredu detektoru, nakoľko tam je jeho najcitlivejšia oblasť. InGaAs detektory sa využívajú pre meranie nízkych vlnových dĺžok od 1300 nm do 1550 nm. Na rozdiel od Ge detektorov majú oveľa menší šum a vysokú rýchlosť odozvy. Rozsah citlivosti je rovnaký ako pri Ge detektorov, avšak ich cena je oveľa väčšia, preto sa využívajú len pri najdražších prístrojoch. My sme si pre našu praktickú časť vybrali fotodiódy zobrazené v tab. 5.1.

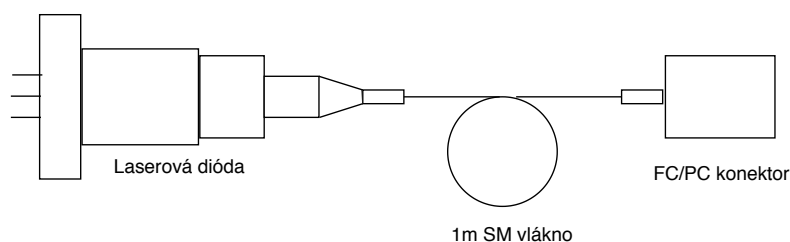
5 Návrh pracoviska a jeho realizácia

V praktickej časti diplomovej práce sa budeme zaoberať meraním optického výkonu na výstupe optovláknového senzoru. Jednotlivé merania budú vyhodnocované pomocou polarimetru PAX 5710 VIS od firmy Thorlabs. Polarimeter graficky vyhodnocuje polarizačné stavy na Poincarého sfére [17].

5.1 Popis použitých komponentov

5.1.1 Laserová dióda LPS-1550-FC

Pre laboratórne meranie bola zvolená laserová dióda LPS-1550-FC s FC konektorom od firmy Thorlabs ako zdroj svetelného signálu (obr. 5.1). Dióda pracuje na vlnovej dĺžke $\lambda = 1550$ nm. Koherentný laserový lúč diódy dosahuje polarizácie až 99 % a je naviazaný do single-mode vlákna s dĺžkou 1 m. Pracovné napätie privádzané na diódu sa pohybuje v rozmedzí 1,5 V–2 V dodávaný pomocou Driveru ITC4001. Operačný prúd diódy je 250–500 mA a výstupný výkon diódy približne 1,5 mW.



Obr. 5.1: Laserová dióda

Laserová dióda je uložená v kompaktnom regulátore, tiež známym ako kontrolórom napájania diódy CLD1010LP [18]. Regulátor dokáže udržiavať a riadiť laserovú diódu do 1 A a udržiavať vysoko stabilnú teplotu pre čo najpresnejšie ustálenie vlnovej dĺžky. Základným prvkom zobrazeného na obr. 5.2 je Peltierov článok, ktorý funguje na princípe výmeny tepla medzi dvoma dosťičkami vďaka prechádzajúcemu prúdu. Pri ochladení jednej z dosťičiek sa druhá zahrieva a naopak. Pri otočení priechodu prúdu sa otáča aj smer toku tepla, takže sa dosťičky ochladzujú a spätne ohrievajú. Veľkou výhodou Peltierovho článku je jeho okamžitý efekt zmeny teploty a jednoduchá regulácia výkonu.



Obr. 5.2: Teplotný regulátor CLD1010LP

5.1.2 Použité PM vlákno a spoje

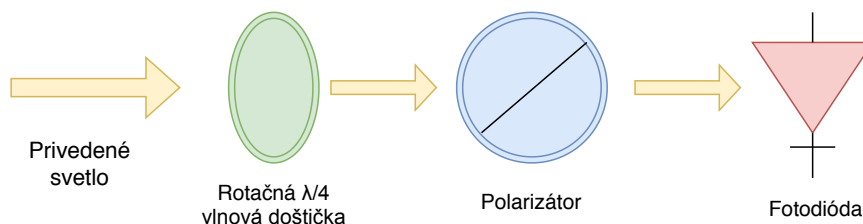
V laboratórnej úlohe budeme využívať vlákno zachovávajúce polarizáciu podľa štandardu G657A o dĺžkach v rozsahu 2 m na vlnovej dĺžke 1550 nm. Káble z optických PM vlákien sú založené na veľmi presnej technike pripojenia. Orientácia os polarizácie je udržiavaná vďaka konektorom s kľúčom určujúcim polohu, ktorý pasuje do zásuvky s nízkou toleranciou odchýlky drážky pre kľúč, čo zaisťuje spoj s najmenším možným vychýlením. Straty výkonu v spojoch sú preto eliminované na minimum.

5.1.3 Polarimeter PAX5710

Konečným zariadením našej navrhutej meranej sústavy je polarimeter typu PAX5710VIS-T s hlavicom PAN5710IR3 vyžarujúca infračervené svetlo s vlnovou dĺžkou 1350-1700 nm (obr. 5.4). Polarimeter má vstupný rozsah výkonu od -60 do 10 dBm, operačnú teplotu od 5-35 °C a maximálny počet vzoriek 333vz/s. Celá sústava je od firmy Thorlabs. Polarimeter je napojený k PC, kde sa budú analyzovať výsledky polarizačných stavov a stupne polarizácie (DOP), ako aj Stokesove vektory pre rôzne merania. K výpočtu týchto parametrov sa používa rýchla Fourierova transformácia.

Princíp polarimetru je založený na privedení optického signálu, ktorý musí byť monochromatický a koherentný so známou vlnovou dĺžkou [19]. Ako môžeme vidieť na obrázku 5.3, privedené svetlo je zarovnané a vyžiarené na rotačnú $\lambda/4$ vlnovú doštičku. Táto doštička mení polarizačný stav podľa zmien rotácie doštičky. Následne polarizátor prepúšťa iba časť svetelného signálu, ktorý je rovnobežný s prenosnou osou. Rotovaním alebo otáčaním vlnovej doštičky sa polarizácia neustále mení, amplitúda svetla prepustená cez polarizátor je modulovaná na fotodióde. Fotodióda premieňa modulovanú optickú intenzitu na modulovaný prúd. Fourierovou analýzou

sú nájdené koeficienty amplitúd svetla, z ktorých sú následne vypočítané Stokesove parametre.



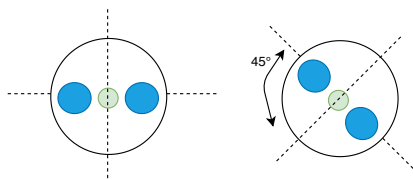
Obr. 5.3: Princíp polarimetru



Obr. 5.4: Polarimeter PAX5710

5.1.4 Optovláknový senzor

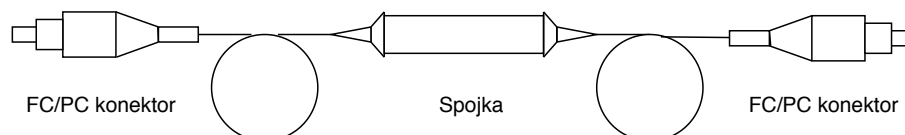
Optovláknový senzor pracuje ako senzor teploty. Toto dvojmetrové vlákno, napojené na dlhú trasu PM vlákna, nie je pokryté ochranným plášťom. Na dlhú trasu je pripojený pomocou FC konektorov, ktoré sú pootočené o 45° , čo znamená, že vlákno je v rámci zapojenia usadené medzi pomalou a rýchlou osou pod rovnakým uhlom trasy a to z dôvodu potreby vybudenia osi rovnomerne. Usadenie optovláknového senzoru je zobrazené na fotke z prílohy A.1. Vlákno bolo vyrobené na zakázku firmou SQS Vlákňová optika a.s.



Obr. 5.5: Usadenie optovláknového senzoru

5.1.5 Lineárny polarizátor ILP1550PM-FC

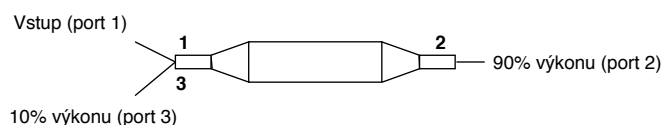
Lineárne polarizátory sú navrhnuté na prepustenie lineárne polarizované svetla pričom blokujú pravouhlú polarizáciu z nepolarizovaného (popr. náhodne polarizovaného) svetelného zdroju. Tieto polarizátory sa tiež môžu použiť pre zvýšenie pomeru blokovania polarizovaného svetla. V našom meraní budeme využívať lineárny polarizátor ILP1550PM-FC (obr. 5.6)[20], zachovávajúci polarizáciu, pričom výstup polarizácie je zarovnaný s pomalou osou vlákna. Pracuje na vlnovej dĺžke 1550 nm, jeho pracovný výkon je do 400 mW a pracuje na teplote od 5°C- 70 °C.



Obr. 5.6: Nákres lineárneho polarizátora ILP1550PM-FC

5.1.6 Delič výkonu

V laboratórnom meraní budeme používať delič výkonu 90:10 PMC1550-90B-FC (obr. 5.7), ktorý zachováva polarizáciu. Delič má 3 porty, do vstupu bude privedený optický signál, ktorý bude následne v PM vlákne rozdelený výkonovo na 90 % pre fotodiódu a 10 % pre polarimeter. Delič bude vložený pred fotodiódu a bude slúžiť pre zobrazenie aktuálnej polarizácie a kontroly správnosti merania. Rozdelenie výkonu by malo spôsobiť len nepatrné zmenšenie výstupného výkonu, výstupy na polarizátore a fotodióde by mali mať porovnateľné priebehy.



Obr. 5.7: Nákres deliča výkonu PMC1550-90B-FC

5.1.7 Fotodióda

Pre naše meranie by sme chceli použiť fotodiódy typu Arzenidu Gália a India (In-GaAs) a Germánia (Ge) od firmy Thorlabs. Na základe charakteristík diód v kapitole 4.4.1 sme sa rozhodli vybrať InGaAs a Ge fotodiódy, nakoľko dokáže pracovať v našom rozsahu vlnovej dĺžky 1550 nm. Ako InGaAs diódu by sme chceli navrhnúť použitie fotodiód FGA01 alebo FGA015. Germániové diódy sme navrhli použiť fotodiódy typu FDG03 alebo FDG05. Porovnanie fotodiód je zobrazené v tabuľke 5.1.

Navrhované diódy				
Názov diódy	Charakteristika	Rozsah vlnovej dĺžky [nm]	Rýchlosť doby nábehu [ns]	Cena [€]
FGA1	Vysoká rýchlosť a malá kapacita	800 - 1700	0,300	57
FGA015	Vysoká rýchlosť a malá kapacita	800 - 1700	0,300	53
FDG03	Veľká aktívna oblasť	800 - 1800	600	112
FDG05	Vysoká rýchlosť	800 - 1800	220	230

Tab. 5.1: Tabuľka porovnania navrhovaných fotodiód

5.1.8 Merač optického výkonu VEGA

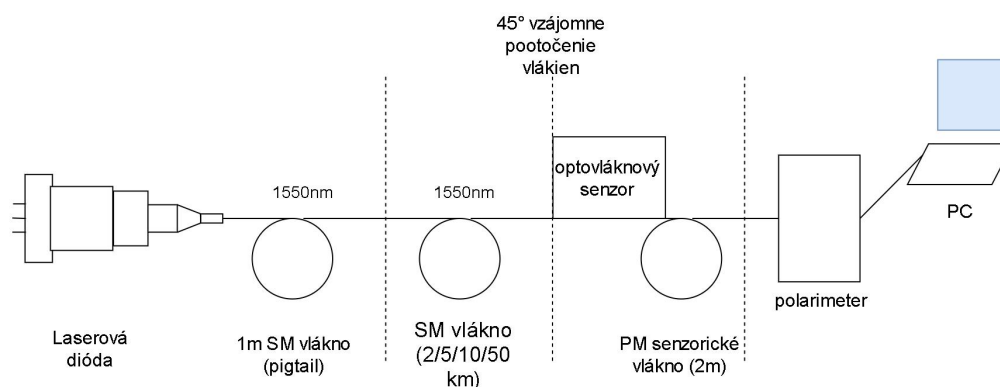
Meracím prístrojom pre získanie dát z optickej trasy sme zvolili VEGA P/N 7Z01560, ktorý používa snímaciu hlavicu PD300 a vyhodnocuje prijatý optický výkon [21].



Obr. 5.8: Merač optického výkonu VEGA

5.2 Návrh pracoviska s polarimetrom

Všetky použité komponenty v tejto laboratórnej úlohe sú od firmy Thorlabs. Úloha začína zapojením laserovej diódy LPS-1550-FC uloženej v kompaktnom regulátore, ktorá vyžaruje vysoko polarizované svetlo s vlnovou dĺžkou 1550 nm. Dióda je napojená na jeden meter dlhý jednovidový pigtail. Vláknou ďalej naväzuje pomocou spojky na SM vláknou, ktoré bude mať v každom meraní inú dĺžku (2-50 km). Následne je SM vláknou prepojené na optovláknový senzor so senzorickým dvojmetrovým PM vláknou. Vlákná sú pomocou optovláknového senzoru voči sebe pootočené o 45° , čo spôsobuje vybudenie pomalej a rýchlej osi optického signálu, kvôli čomu budeme môcť na výstupe sledovať dva rôzne vektory. Pokiaľ by nedošlo k otočeniu, na výstupe by sa zobrazoval len jeden ideálne polarizovaný vektor. Výstup zo senzorického vlákna je privedený na hlavicu polarimetru pomocou FC konektoru a tá posiela údaje do polarimetru, ktorý je pripojený k počítaču. Na počítači môžeme sledovať pohyb sledovaného bodu v Poincarého sfére, hodnoty Stokesových vektorov, stupeň polarizácie DOP a stav polarizácie SOP. Navrhované pracovisko je zobrazené na naslednom obrázku 5.9.



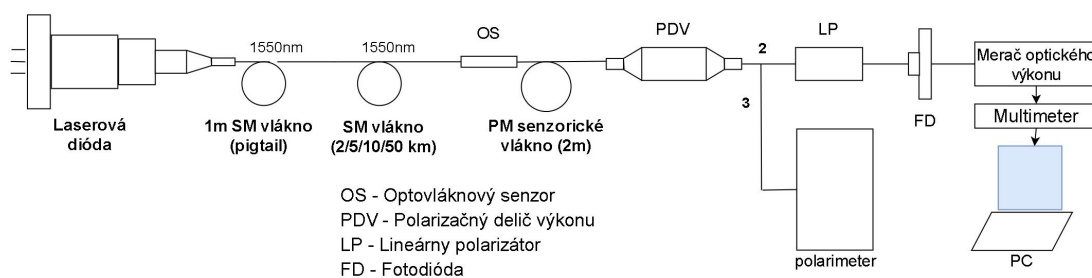
Obr. 5.9: Schéma navrhovaného pracoviska

Nakoľko je cena polarimetru celkom vysoká, nasledujúci návrh bude finančne menej náročný. Namiesto polarimetru bude použitá nami vybraná fotodióda, pomocou ktorej sa bude rozoberať elektrický signál na výstupe. Samozrejme bude zapojený aj polarimeter, aby sme si mohli otestovať správnosť a funkčnosť zapojenia.

5.3 Návrh zapojenia z fotodiódou a polarimetrom

Schéma zapojenia je rovnaká ako v predchádzajúcej kapitole až po koniec senzorického vlákna, ktoré následne vstupuje do portu 1 deliča výkonu. Delič následne

rozdeľuje signál do dvoch výstupných portov, pomerom 90:10. z portu 2 vychádza 90 % svetelného výkonu, ktorý je vedený do lineárneho polarizátoru, pomocou ktorého môžeme snímať výkon práve medzi osami na fotodióde. Fotodióda meria prúd v závernom smere, pričom jej výstup je napojený na merač optického výkonu. Následne je z merača pripojený multimeter, ktorý prevádza prúd na napätie. Na počítači sa zapisujú dáta a vytvárajú grafy v exceli. Z portu 3 vychádza zvyšných 10 % svetelného výkonu a je napojený na polarimeter pre porovnanie výsledných hodnôt a grafov z fotodiódy. Výsledky by mali byť podobné. Pre ďalšie meranie budú porty 2 a 3 prehodené pre porovnanie výsledkov a vyhodnotenie funkčnosti fotodiódy. Celková schéma zapojenia je zobrazená na obr. 5.10.

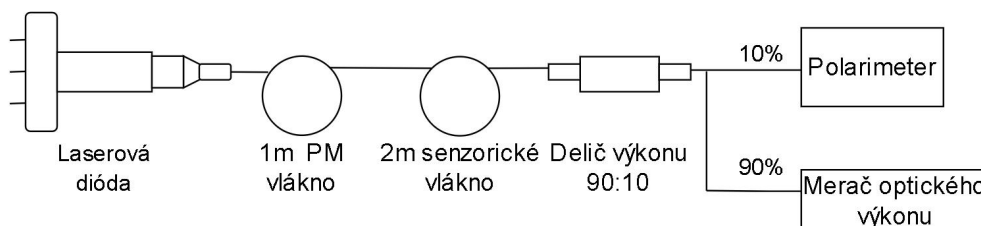


Obr. 5.10: Schéma navrhovaného pracoviska s fotodiódou

6 Praktická realizácia navrhnutého merania

Kapitola sa zaoberá praktickým zhotovením navrhnutého pracoviska, spracovaním nameraných výsledkov a ich vynesenie do grafov. Vynesenie výsledkov bolo realizované pomocou polarimetru PAX571 a merača optického výkonu VEGA, pričom bol v trase zapojený delič výkonu 90:10. Celé meranie trvalo 920 s, pričom v čase 140 s sekúnd bola priložená nad senzorické vlákno kádinka s ľadovou triešťou s teplotou 0 °C, raz kádinka s teplotou 24 °C a raz kádinka s teplotou vody 48 °C. Jednotlivé teploty boli odmerané pomocou teplomeru. Pri jednotlivých meraniach boli tieto kádinky odobrané v čase 470 s a meranie pokračovalo až do jeho konca. Nameraným výsledkom a ich vyhodnotením sa budeme venovať v ďalších kapitolách. Teplota okolia bola 24 °C, pracovisko a všetky merania sú merané pri vlnovej dĺžke 1550 nm. Fotka pracoviska je zobrazená v prílohe.

Zapojenie je zobrazené na obrázku 6.1. Laserová dióda je pripojená cez jednometrové SM vlákno do 2 m senzorického PM vlákna, na ktorom budeme sledovať zmeny pri rôznych teplotách. Optický signál je následne privedený do deliča výkonu, 10 % vedie do polarimetru a 90 % do merača optického výkonu VEGA.



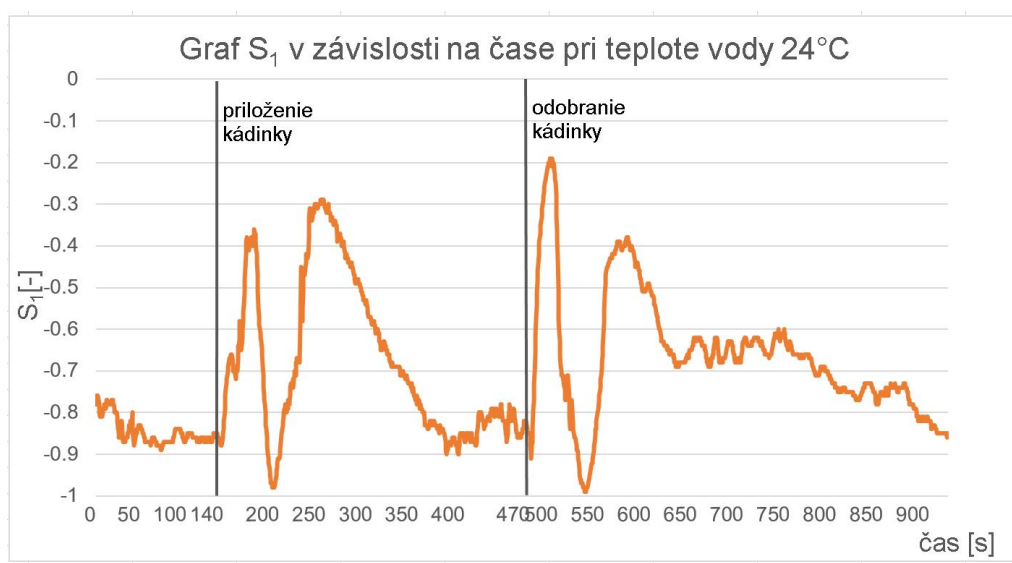
Obr. 6.1: Praktická realizácia merania

6.1 Referenčné meranie

Ako prvé bolo vykonané referenčné meranie, pomocou ktorého neskôr vyhodnotíme odchýlku jednotlivých meraní. Voda v kádinke mala teplotu okolia, to znamená 24 °C, nakoľko bola odstáta. V trase bol zapojený delič výkonu, pomocou ktorého sme 90 % svetelného výkonu napojili na merač optického výkonu VEGA a 10 % svetelného výkonu na polarimeter. Na polarimetre boli merané Stokesove vektory S_1 , S_2 a S_3 , stupeň polarizácie DOP, okamžitý stav polarizácie SOP a na merači optického výkonu VEGA optický výkon.

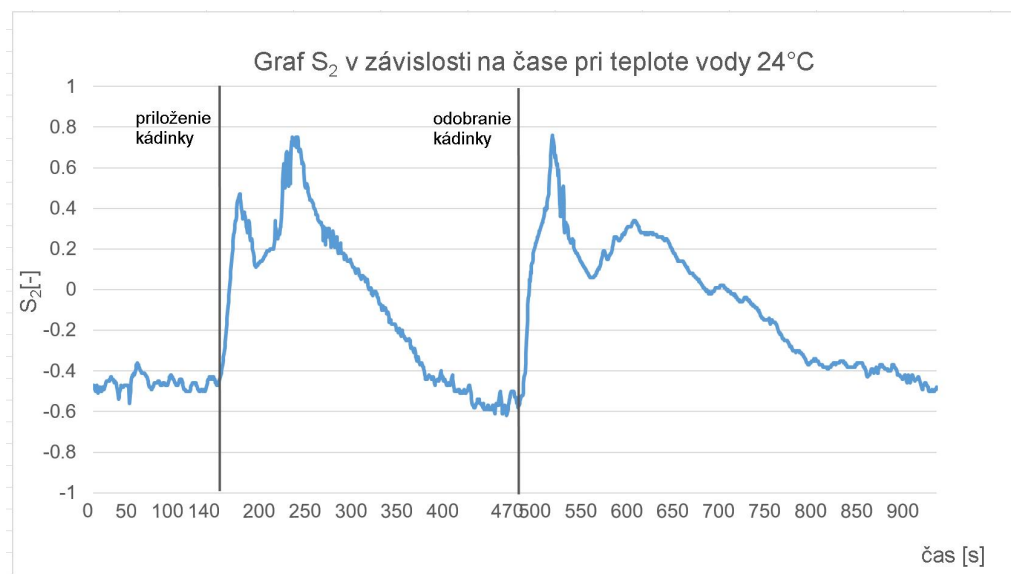
6.1.1 Analýza nameraných výsledkov

V prvom grafe Stokesoveho vektoru S_1 (viz. 6.2) môžeme na začiatku merania sledovať nepatrné zmeny sledovaného bodu v Poincarého sfére, každopádne po priložení kádinky s vodou izbovej teploty v čase 140 s dochádza k rýchlym zmenám, pričom približne po 100 sekundách môžeme sledovať pomalé ustálenie priebehu, čím sa ustáľuje aj teplota na senzorignom vlákne. Po odobraní kádinky v čase 470 s sledujeme opäť rýchle zmeny a zúženie priebehu, pričom sa sledovaný bod pohybuje v opačnom smere a približne kopíruje zrkadlovo priebeh po priložení kádinky. Po nejakom čase môžeme opäť sledovať ustálenie priebehu. Sledovaný bod sa pohyboval na y-ovej osi iba hodnotách od 0 po -1.



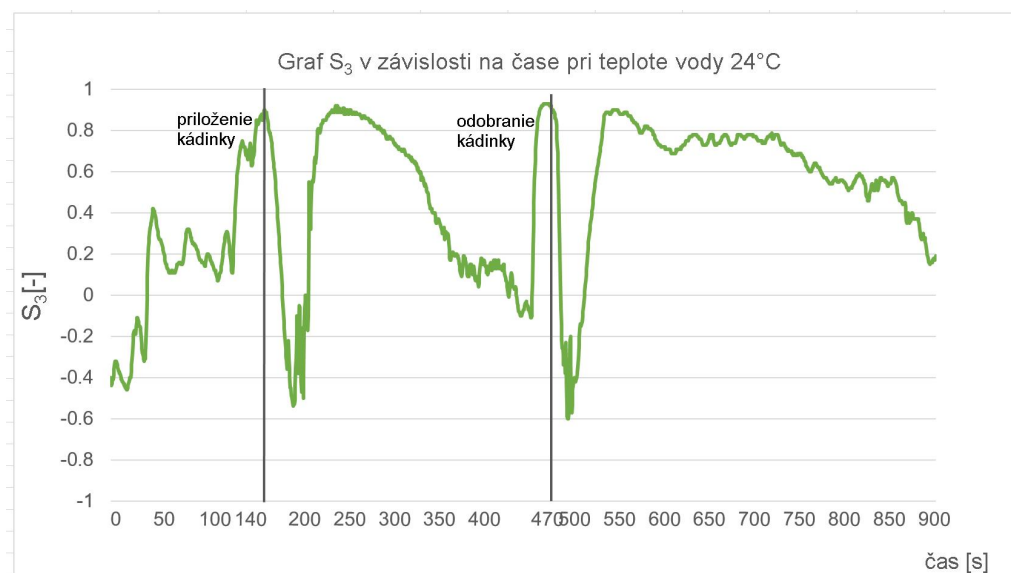
Obr. 6.2: Znážornenie pohybu bodu v rovine Stokesoveho vektoru S_1

V druhom grafe Stokesoveho vektoru S_2 (viz. 6.3) môžeme na začiatku do priloženia kádinky sledovať minimálne zmeny sledovaného bodu, čo sa však rýchlo zmení v 140 s po priložení kádinky. Sledovaný bod zaznamenáva zmenu, pričom zmeny sú pomalé a po viac ako 100 s môžeme vidieť že sa bod začína ustáľovať až do odobrania kádinky, kde je priebeh zrkadlovo veľmi podobný pohybu sledovaného bodu po priložení kádinky. Opäť sa po nejakom čase bod ustáľuje a dostáva sa do podobného stavu, v akom bol na začiatku merania. Sledovaný bod sa pohybuje už v oboch poloviciach Poincarého sféry, pričom môžeme vidieť, že opisuje pohyb kružnice.



Obr. 6.3: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_2

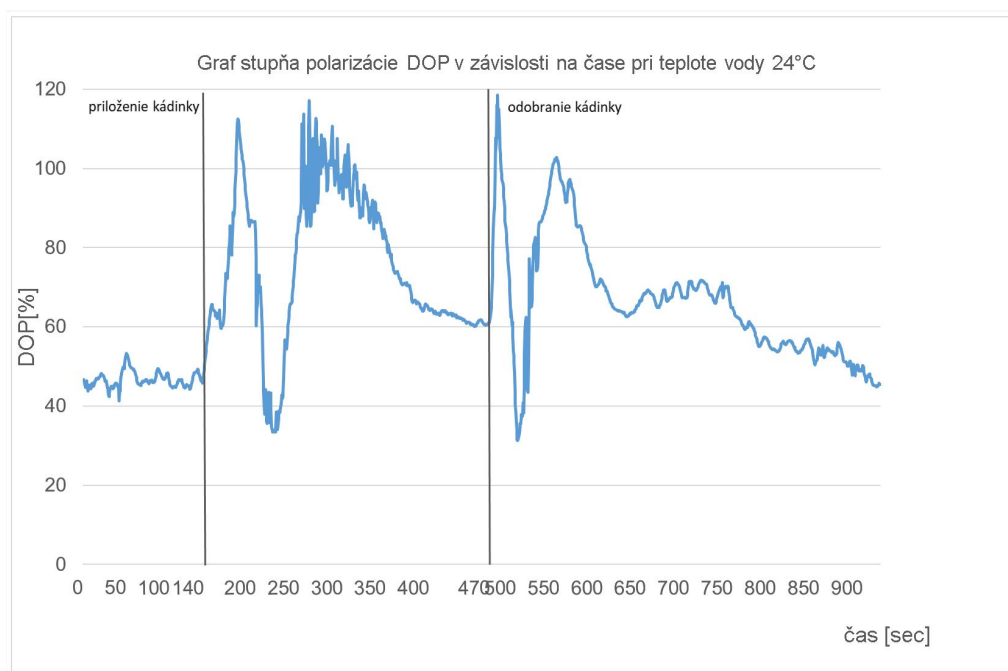
V poslednom treťom grafe Stokesoveho vektoru S_3 (viz. 6.4) môžeme na začiatku merania sledovať malé zmeny, ktoré môžu byť spôsobené pohybom v miestnosti, poprípade nejakými inými rušivými elementami. Pri priložení kádinky opäť sledujeme zmenu sledovaného bodu, pričom zmeny nie sú chaotické a bod sleduje tvar neúplnej kružnice, kde sa následne ustáluje približne pri 400s. Po odobraní kádinky môžeme sledovať zrkadlové správanie sledovaného bodu. Bod sa pohyboval v oboch poloviciach Poincarého sféry.



Obr. 6.4: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3

Posledným grafom z polarimetru je stupeň polarizácie sledovaného bodu (viz. 6.5). Z priebehu grafu sledujeme podobnú analógiu ako pri predošlých meraní. DOP sa na začiatku merania nemení, výrazná zmena nastáva po priložení a odobraní kádinky.

Hodnoty DOP sa pohybujú v rozmedzí 30 až 120 %, čo je chyba merania spôsobená pravdepodobne zlou kalibráciou merača výkonu. Stupeň polarizácie nemôže prekročiť hodnotu 100 %.

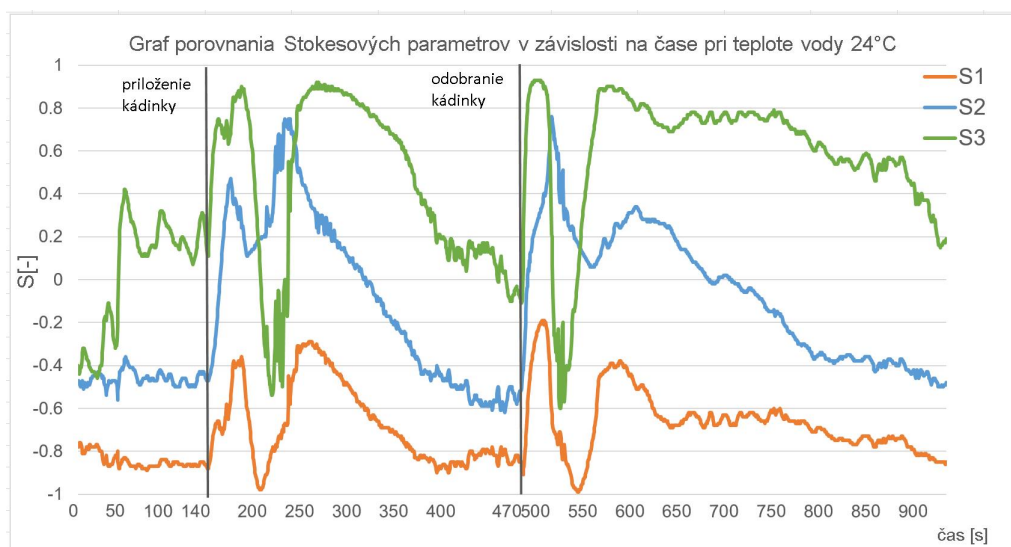


Obr. 6.5: Znázornenie stupňa polarizácie DOP

6.1.2 Porovnanie výsledkov referenčného merania

Pre lepšie zobrazenie výsledkov bol vytvorený graf so všetkými tromi Stokesovými vektormi (viz. 6.6), kde môžeme sledovať, že ich priebeh je veľmi podobný a sledovaný bod má rovnaké charakteristiky. Na začiatku merania je sledovaný bod v pokoji a sledujeme jeho minimálne zmeny spôsobené okolitým prostredím. Po priložení kádinky s vodou v čase 140s sledujeme prvé väčšie zmeny, pričom sa bod za nejaký čas začína ustáľovať až do odobranie kádinky, kde vo všetkých troch prípadoch bod zrkadlovo sleduje bod pred priložením a vracia sa po rovnakej trase. Jednotlivé vynešené grafy Stokesových vektorov nie sú tak presné a nepohybujú sa až k hraničným bodom -1 a +1 na Poincarého sfére, čo však môžeme odôvodniť tým, že z deliča optického výkonu bolo pre parameter posielané len 10 % optického výkonu. Kvôli

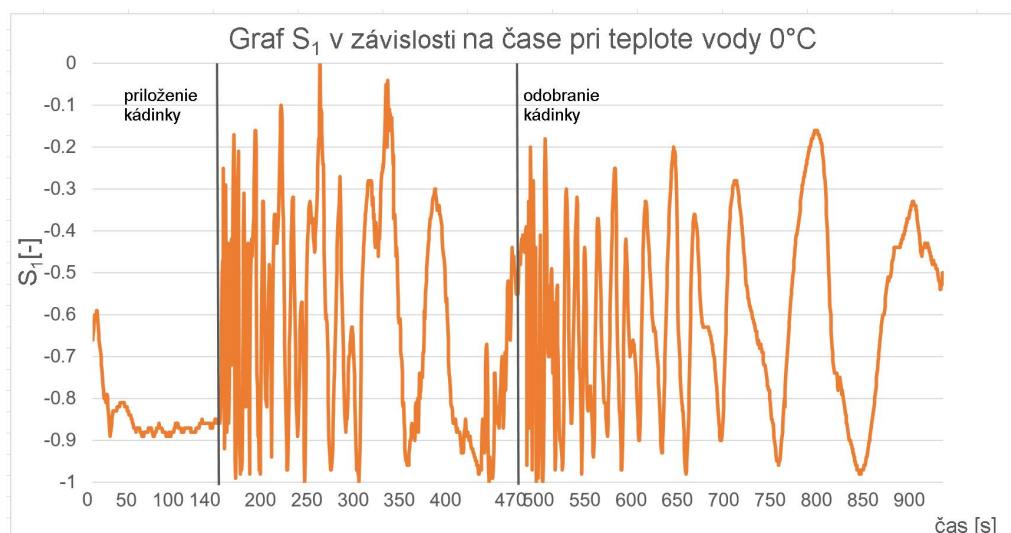
tejto skutočnosti sú výsledky mierne skreslené, avšak aj napriek tomu sme otestovali správnosť zmien sledovaného bodu pri zmene teploty na senzorigom vlákne.



Obr. 6.6: Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote 24°C

6.2 Meranie pri teplote vody v kádinke 0 °C

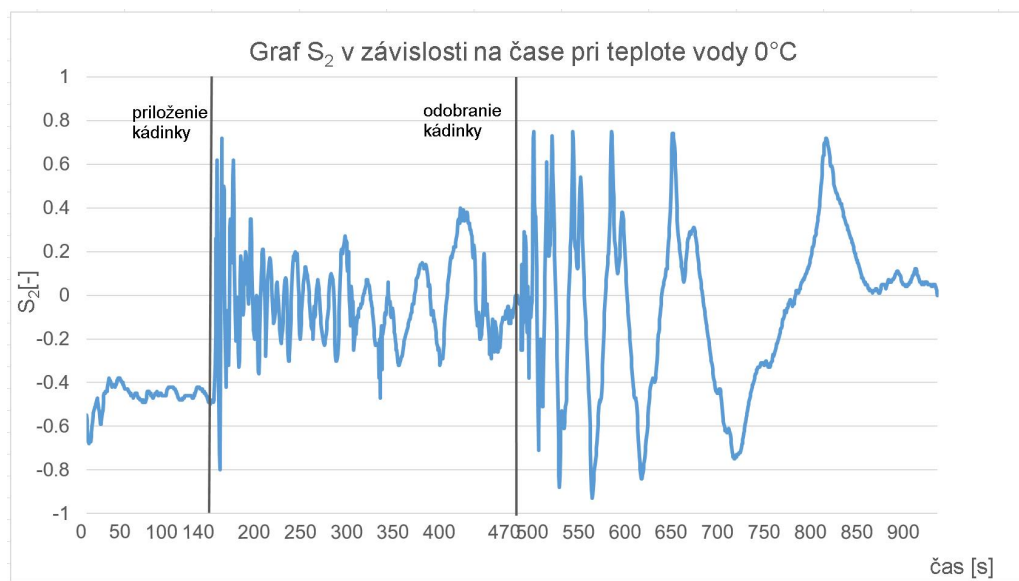
V našom ďalšom meraní sme zmenili teplotu vody v kádinke na 0 °C, ostatné parametre merania zostali rovnaké.



Obr. 6.7: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_1

Prvý vynesený graf je graf Stokesoveho vektora S_1 (viz. 6.7). Na začiatku merania sa sledovaný bod hýbe po Poincarého sfére pravdepodobne kvôli pohybu vlákna, po nejakom čase sa priebeh ustáli až do priloženia kádinky s vodou. Následne môžeme sledovať veľmi rýchle pravidelné zmeny a úzky priebeh signálu. Postupom času sa začal priebeh rozťahovať, čo si môžeme vysvetliť ustálovaním teploty na senzorigovom vlákne. Priebeh sledovaného bodu na Poincarého sfére sa po odobratí kádinky začal opäť rýchlo meniť, priebeh sa zúžil a postupne sa začal rozťahovať až po koniec merania. Sledovaný bod sa pohybuje na y-ovej ose medzi 0 a -1, kruhový pohyb nebol primárne v tomto vektore.

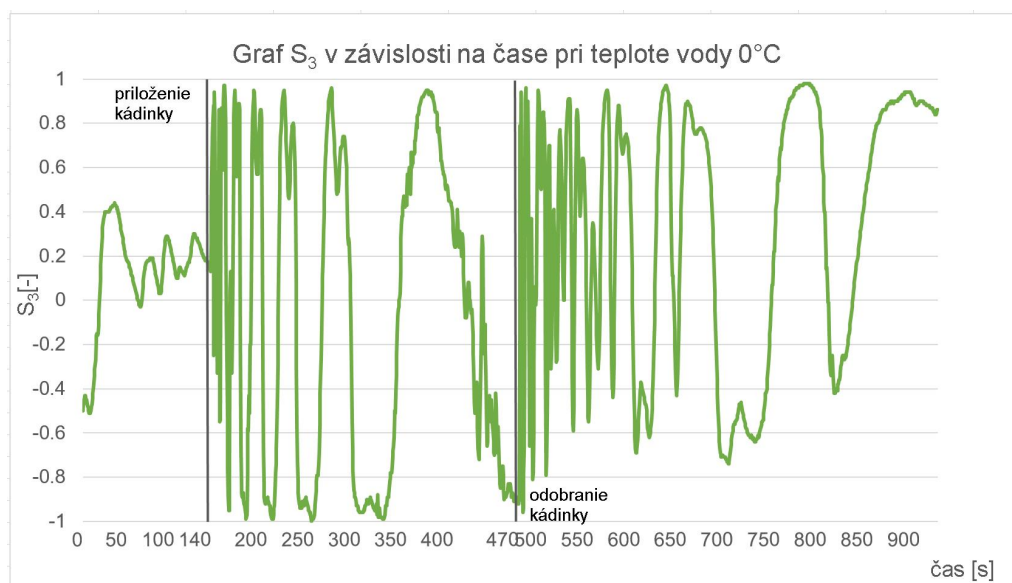
Ďalším grafom je graf Stokesoveho vektora S_2 (viz. 6.8). Sledovaný bod sa pohybuje v rozmedzí na y-ovej osi od 0,8 po -0,8. Kvôli tomuto faktoru a faktoru, že sledovaný bod má ostré prechody, ktoré popisujú neúplnú kružnicu môžeme konštatovať, že toto nie je vektor, v ktorom sa sledovaný bod primárne pohybuje. Priebeh sa opäť opakuje, po priložení kádinky nastávajú rýchle zmeny s užším signálom, ktoré sa po čase rozťahujú až do bodu po odobraní kádinky. Sledovaný bod zrkadlovo nekopíruje trasu pred priložením kádinky.



Obr. 6.8: Znáozornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektora S_2

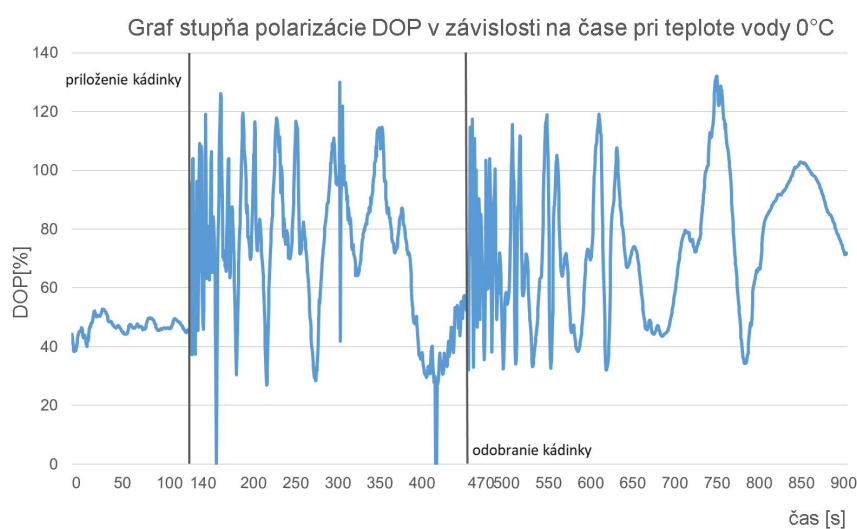
Najpodstatnejším grafom je graf Stokesoveho vektora S_3 (viz. 6.9), kde môžeme na začiatku vidieť pohyby sledovaného bodu spôsobené pravdepodobne pohybom vlákna alebo pohybom v miestnosti. Po priložení kádinky sledujeme opäť rýchle zmeny s ostrými prechodmi a úzkym signálom, ktorý sa ale po ustálení približuje k pohybu po neúplnej kružnici, čo sledujeme oblúkovými vrcholmi priebehu. Hodnoty nabierajú hodnoty na y-ovej ose od -1 do +1, až po odobranie kádinky, kde sa z dôvodu pravdepodobne vplyvom zapojenia nedotáhoval priebeh signálu po -1

bod na y-ovej ose. Pribeh sa však po ustálení veľmi podobá neúplnej kružnici a zrkadlovo opisuje trasu od priloženia kádinky.



Obr. 6.9: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3

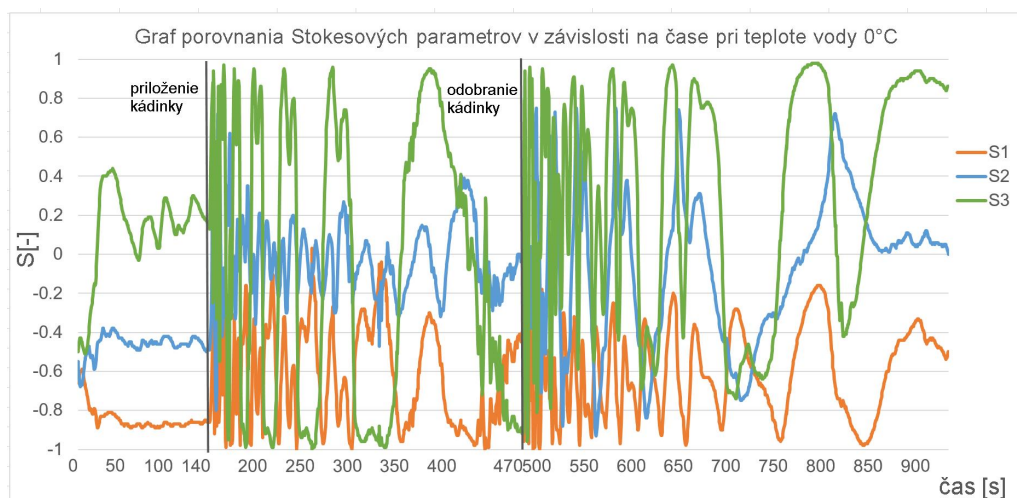
Posledným grafom nameraným z polarimetru je stupeň polarizácie sledovaného bodu (viz. 6.10). Z priebehu grafu sledujeme podobnú analógiu ako pri predošlých meraniach. DOP sa na začiatku merania nemení, výrazná zmena nastáva po priložení a odobraní kádinky. Hodnoty DOP sa pohybujú v rozmedzí 0 až 120 %, čo je spôsobené pravdepodobne zlou kalibráciou meracieho prístroja.



Obr. 6.10: Znázornenie stupňa polarizácie DOP

6.2.1 Porovnanie výsledkov merania pri teplote vody 0 °C

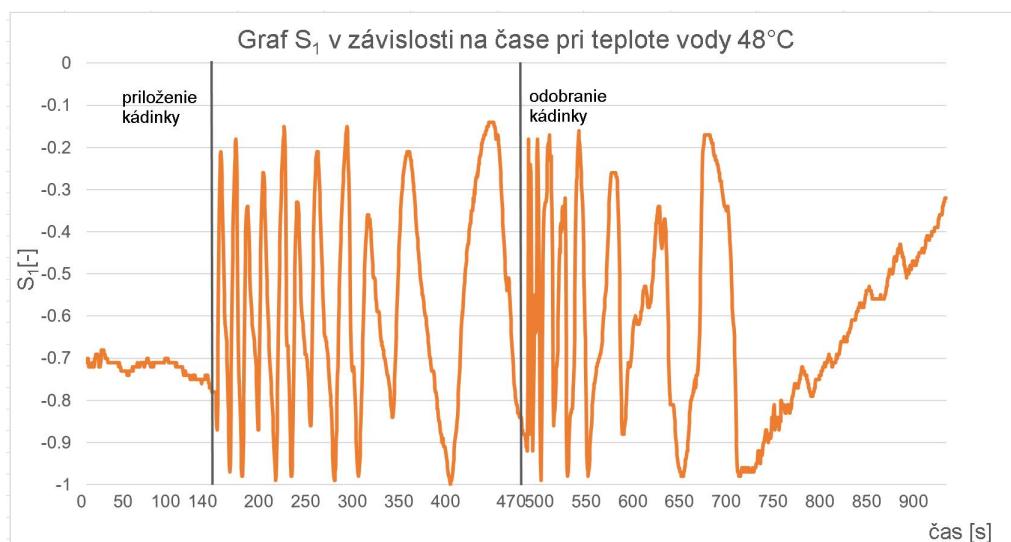
Pre lepšie porovnanie nameraných výsledkov Stokesových vektorov bol vynesенý graf porovnania jednotlivých Stokesových vektorov (viz. 6.11), na ktorom môžeme vidieť, že sledovaný bod sa najviac pohyboval vo vektore S_3 , kde môžeme sledovať ako bod opisuje dráhu neúplnej kružnice a pre väčšinu merania nadobúda hodnoty na y-ovej ose od -1 po +1. Každopádne priebehy všetkých troch grafov majú veľmi podobný charakter, kde po priložení sledujeme náhlu zmenu signálu s úzkym signálom a ostrými vrcholmi, kde sa následne postupom času signál rozťahuje a vrcholy majú oblúkovité priebehy, čo pripisujeme faktu, že teplota senzorického vlákna sa dostáva bližšie k teplote ľadovej triešte v kádinke.



Obr. 6.11: Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote vody 0 °C

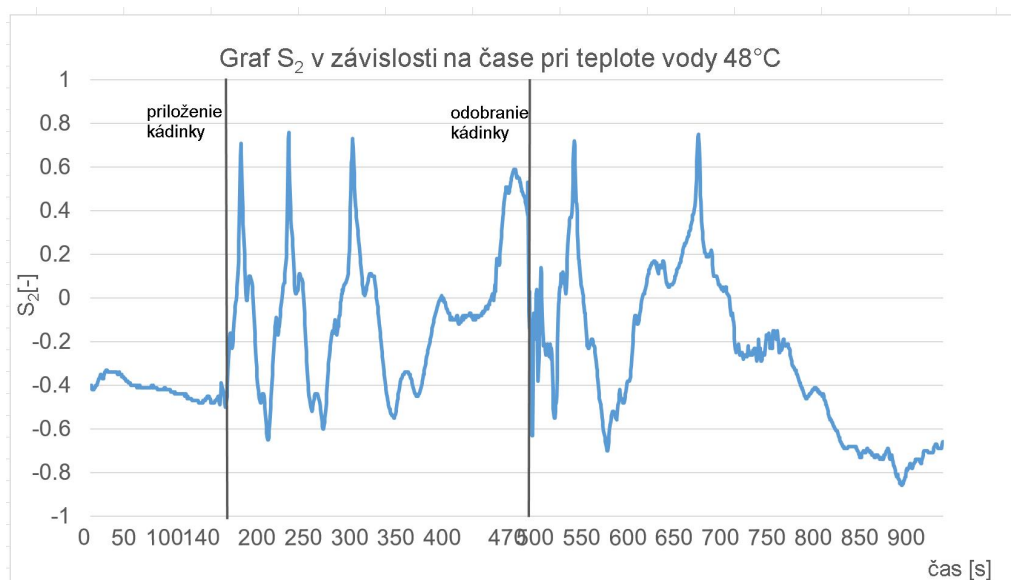
6.3 Meranie pri teplote vody v kádinke 48 °C

Ako posledné meranie sme sa rozhodli spraviť meranie s teplotou vody v kádinke 48 °C. Prvý vynesенý graf je graf Stokesoveho vektoru S_1 (viz. 6.12). Začiatok merania prebieha ako zvyčajne a to nepatrnými zmenami sledovaného bodu. Po priložení kádinky sledujeme rýchle zmeny signálu s ostrými vrcholmi, signál sa však po čase opäť rozťahuje a vrcholy začínajú mať viac oblúkový charakter, nakoľko sa teplota senzorického vlákna približuje k teplote vody v kádinke. V okamihu tesne po odoberaní kádinky s vodou sledujeme zrkadlový priebeh ako pri priložení kádinky, sledovaný bod sa vracia po veľmi podobnej trase, ku koncu merania (od 710s) sledujeme ustálenie bodu a pomalú zmenu pohybu sledovaného bodu. Hodnoty na y-ovej ose sa pohybujú najmä v rozsahu od -1 po -0,2, z čoho môžeme odvodiť, že sledovaný bod sa nepohybuje primárne v tomto vektore.



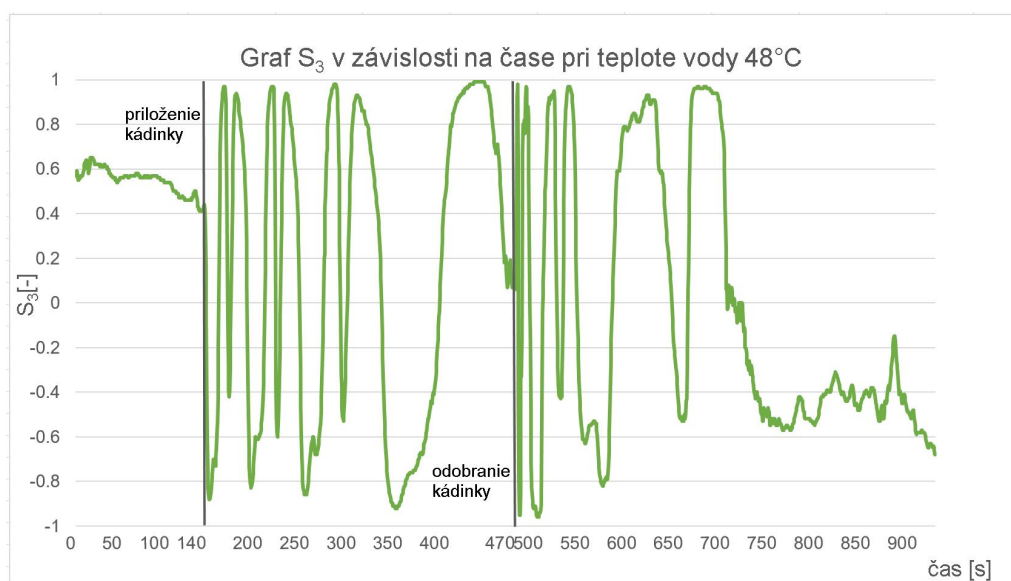
Obr. 6.12: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_1

Ďalší graf Stokesovho vektoru S_2 (viz. 6.13) zobrazuje hodnoty na y-ovej ose od -0,8 po +0,8 a vrcholy počas celého merania nemajú oblúkový tvar z čoho môžeme vyviesť záver, že sa sledovaný bod nepohyboval primárne v tomto vektore. Po priložení kádinky v čase 140s opäť sledujeme zmeny s ostrými vrcholmi, ale tieto zmeny nie sú také rýchle ako pri vektore Stokesovho vektoru S_1 . Po odobraní kádinky sa sledovaný bod nevracia presne po tej istej trase, avšak môžeme vidieť podobnosti v jeho pohybe. Ku koncu merania sa priebeh opakovane ustáluje pretože sa teplota senzorického vlákna približuje k teplote vody.



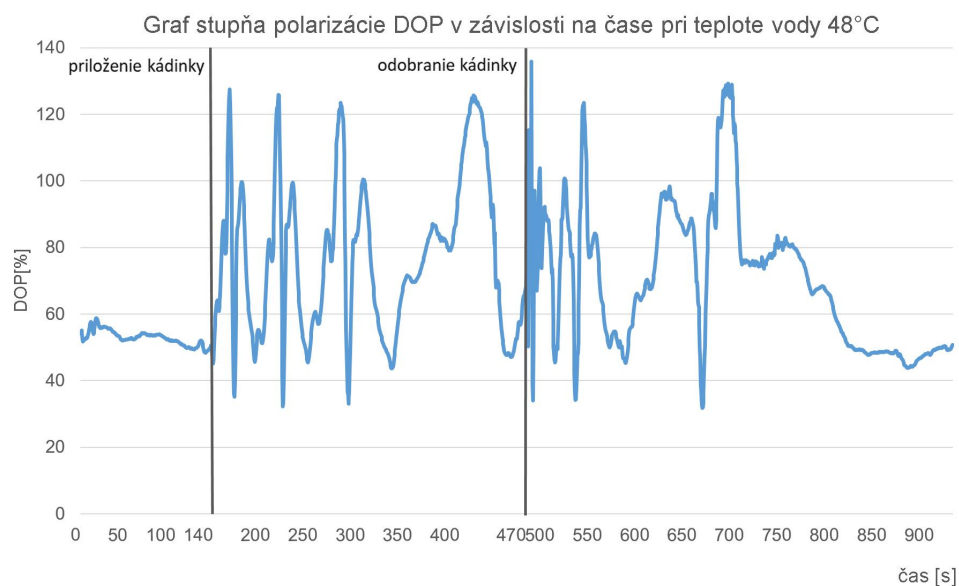
Obr. 6.13: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_2

Najpodstatnejším Stokesovým vektorom pre naše meranie je S_3 . Na začiatku merania sa sledovaný bod pohybuje pravdepodobne vplyvom pohybu vlákna, avšak tento pohyb je pre meranie nepodstatný. Okamžite po priložení kádinky sledujeme zmeny, ktorých vrcholy majú charakter oblúkovitý a pohybujú sa po neúplnej kružnici (na y-ovej ose hodnoty od -0,9 po +1). Po nejakom čase sa priebeh signálu ustáluje a zmeny sú pomalé až po odobranie kádinky, kde je užší signál a ostrejšie vrcholy. Po čase sa signál rozťahuje a priebeh je hladší, avšak od približne 600 s sa y-ové hodnoty pohybujú už len od -0,6 po 1, čo môže byť spôsobené viacerými faktormi, ako sú pohyby vlákna alebo pohyby v miestnosti, po prípade iná manipulácia v miestnosti a okolia. Celý priebeh merania je znázornený v grafe 6.14.



Obr. 6.14: Znázornenie pohybu bodu v rovine Stokesovho vektoru S_3

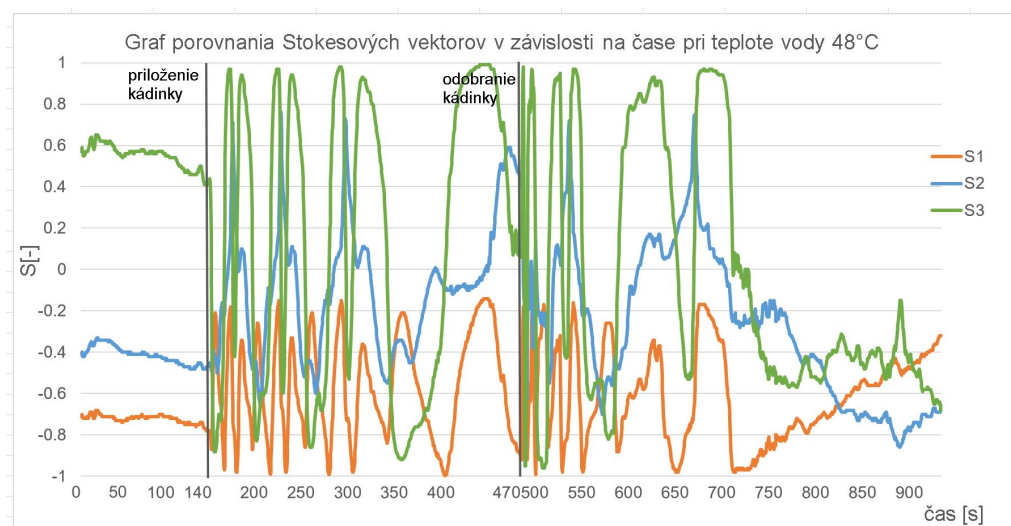
Posledným vynesným grafom v tejto kapitole je graf stupňa polarizácia DOP zobrazený na obrázku 6.15. Hodnoty sa pohybujú v rozmedzí 35 až 120 %, čo je opäť chyba merania, nakoľko stupeň polarizácie nemôže prekročiť hodnotu 100 %. Zmeny DOP do priloženia kádinky sú nepatrné. V čase 140 s sledujeme zmeny, kde sa DOP rýchlo mení a ustáluje sa až po dlhšej dobe. Po odobraní kádinky sledujeme ešte rýchlejšie zmeny DOP, ktoré sa ustálujú až ku koncu merania (približne pri 800 s).



Obr. 6.15: Znázornenie stupňa polarizácie DOP

6.3.1 Porovnanie výsledkov merania pri teplote vody 48 °C

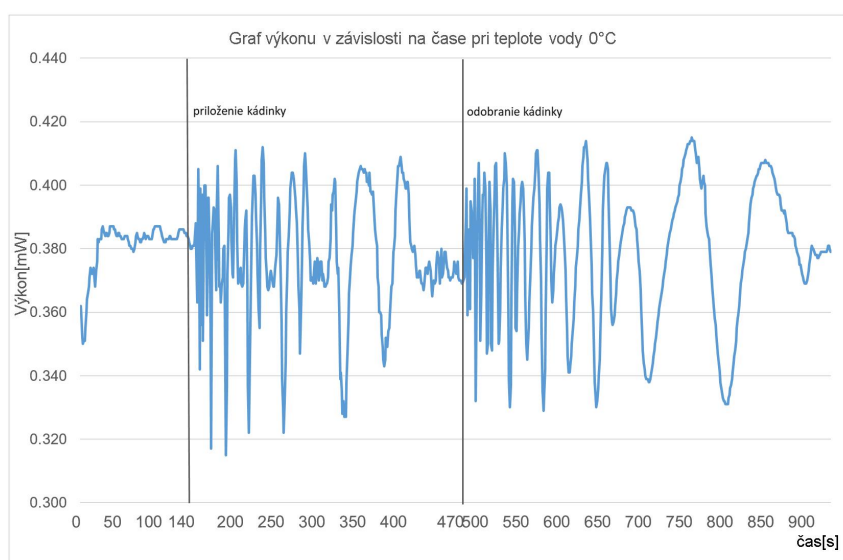
Pre lepšie znázornenie nameraných výsledkov bol zhotovený graf porovnania Stokesových vektorov pre toto meranie s teplotou vody 48 °C (viz. 6.16). Pribeh sledovaného bodu je veľmi podobný ako pri meraniach s inou teplotou vody, a to na začiatku merania pred priložením kádinky nepatrne zmeny s ustáleným priebehom. Podobný priebeh s ostatnými priebehmi sledujeme aj po odobraní kádinky, kde sa po nejakom čase ustáluje teplota senzorického vlákna k teplote vody a priebeh signálu sa rozťahuje a sledujeme pomalé hladké zmeny. To najpodstatnejšie sa deje krátko pri priložení a odobraní kádinky, kde je skoková zmena teploty, čo má za následok rýchle zmeny s ostrými vrcholmi, ktoré sa postupom času spomaľujú a vrcholy majú viac oblúkovitý charakter. Na grafe môžeme vidieť, že sledovaný bod sa pohyboval najmä vo vektore S_3 , kvôli y-ovým hodnotám pohybujúcim sa pre väčšinu merania po celom rozsahu, ako aj pohybom bodu po neúplnej kružnici.



Obr. 6.16: Porovnanie Stokesových vektorov pri teplote 48 °C

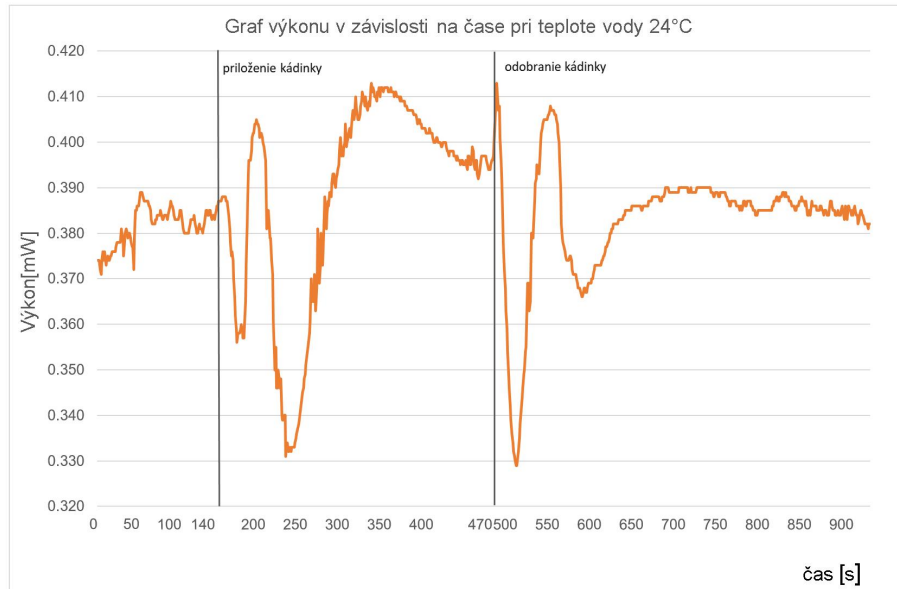
6.4 Meranie na merači optického výkonu

Na merač optického výkonu bolo z deliča výkonu privedené 90 % svetelného výkonu optickej trasy a boli vynesené tri grafy, každý pri rôznej teplote vody v kádinke. Všetky tri grafy majú na začiatku len mierne výkyvy optického výkonu a následne pri priložení kádinky s vodou sledujeme zmeny. Na grafe 6.17 sledujeme po priložení najväčšie výkyvy optického výkonu, výkon sa na rozdiel od iných meraní ustáluje najdlhšie. Po odložení kádinky sledujeme veľmi podobný zrkadlový priebeh optického výkonu. Hodnoty výkonu sa pohybujú medzi 320-400 μW .



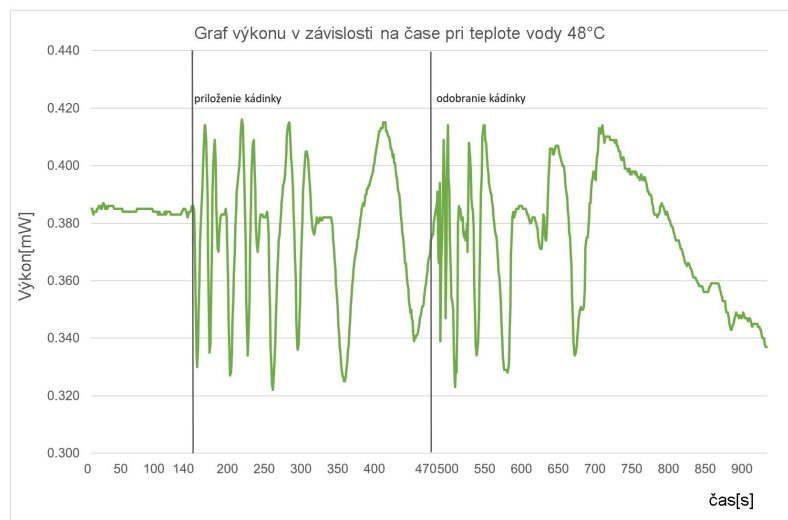
Obr. 6.17: Nameraný optický výkon pri teplote 0 °C

Najmenšie a najpomalšie zmeny zaznamenáva optický výkon pri teplote vody 24 °C (viz. 6.18), nakoľko je teplota vody rovnaká ako teplota okolia a senzorické vlákno nemusí svoju teplotu tak výrazne prispôbovať teplote vody. Hodnoty výkonu sa pohybujú medzi 330-410 μW .



Obr. 6.18: Nameraný optický výkon pri teplote 24 °C

Na poslednom grafe 6.19 sú po priložení kádinky s vodou tiež zmeny, avšak nemajú taký úzky priebeh ako pri teplote vody, čo je spôsobené prúdením tepla, pri topení ľadovej triesky ľahšia voda stúpa a dole ju nahrádza chladnejšia voda z vyšších vrstiev kvapaliny.



Obr. 6.19: Nameraný optický výkon pri teplote 48 °C

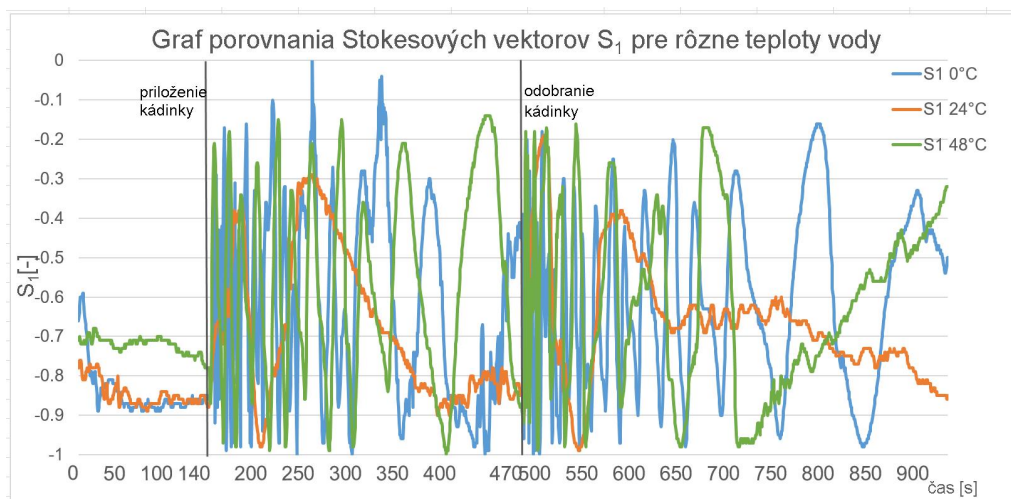
7 Diskusia nad nameranými výsledkami

Táto kapitola je zameraná na vyhodnotenie a porovnanie nameraných hodnôt jednotlivých meraní pre Stokesove vektory S_1 , S_2 a S_3 , ako aj stupeň polarizácie pre rôzne teploty vody pri našich troch meraniach. Najviac významným Stokesovým vektorom pre naše meranie je S_3 , nakoľko sa sledovaný bod pri meraniach pohyboval na Poincarého sfére najviac v rovine tohto vektoru, ako budeme môcť vidieť na grafoch. Ďalším zaujímavým výsledkom je sledovanie zmeny sledovaného bodu pri rôznych teplotách vody v kádinke.

Pre opakovanie si pripomenieme, že nasledujúce grafy sú namerané na polarietre, do ktorého sa privádzalo z deliča výkonu 10 % celkového optického signálu, čo sa mohlo podpísať na výsledných charakteristikách, každopádne pre potvrdenie vplyvu zmeny teploty je aj desatina optického výkonu dostačujúca.

7.1 Stokesov vektor S_1 pri rôznych teplotách merania

V zobrazenom grafe 7.1 je zobrazený Stokesov vektor S_1 pre teploty vody v kádinke 0°C, 24°C a 48°C. Na prvý pohľad vidíme, že sa sledovaný bod počas celej dĺžky merania pohybuje na y-ovej osi v rozmedzí od 0 po -1, z čoho môžeme odvodiť, že tento vektor není primárny pre naše meranie.



Obr. 7.1: Graf Stokesovho vektoru S_1 pri rôznych teplotách merania

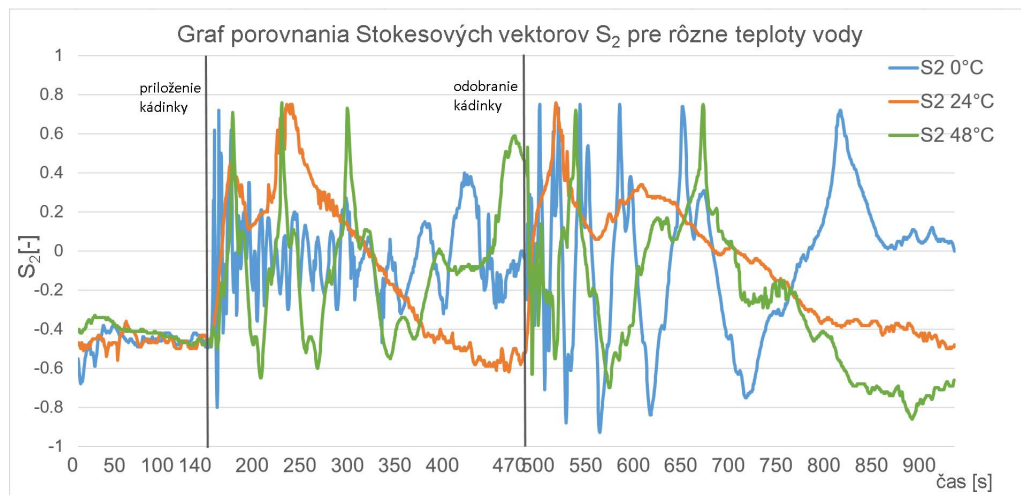
Ďalším pozorovateľným faktorom je, že sme si overili vplyv zmeny teploty na sledovaný bod v Poincarého sfére. Pred priložením kádinky sa sledovaný bod pohyboval nepatrne, avšak hneď po priložení a odložení môžeme sledovať okamžitú reakciu. Najmenšiu reakciu na zmenu je pri teplote vody 24°C, tento výsledok je

očakávaný. Senzorické vlákno má podobnú teplotu ako voda v kádinke, preto môžeme sledovať pomalé zmeny počas celého merania. Čo je zaujímavé je porovnanie priebehu pri 0°C a 48°C . Z vynesných hodnôt sledujeme, že pri teplote 0°C sú zmeny väčšie, priebeh signálu je užší a vrcholy sú ostrejšie. Ustálenie sledovaného bodu trvá dlhšie ako pri 48°C , čo je spôsobené dlhším ustálením teploty senzorického vlákna a teploty vody. Tiež si musíme uvedomiť, že pri ľadovej triede sa voda kvôli teplote prostredia otepľovala a začala sa topiť a premenila sa na kvapalné skupenstvo, čo mohlo spôsobiť väčšie zmeny ako pri teplote vody 48°C .

7.2 Stokesov vektor S_2 pri rôznych teplotách merania

Z grafu Stokesovho vektoru S_2 (viz. 7.2) sledujeme, že sa sledovaný bod pohyboval na y-ovej osi v rozmedzí 0,8 až $-0,9$, avšak charakter sledovaného bodu neopisuje úplnú kružnicu, hodnoty sa nepohybujú až k hranici ± 1 a vrcholy nie sú oblúkovité ale špicaté.

Na rozdiel od Stokesovho vektoru S_1 sú zmeny pri všetkých meraniach s rôznymi teplotami podstatnejšie pomalšie, celkovo je priebeh signálu hladší a viac rozťahnutý. Najmenšie zmeny sledujeme pri teplote 24°C , čo sa dalo predpokladať. Pri meraní s teplotou vody 48°C môžeme pozorovať, že po priložení a odložení kádinky sa sledovaný bod ustáluje v časovo kratšom intervale ako pri 0°C , ustálenie teploty senzorického vlákna je rýchlejšie.

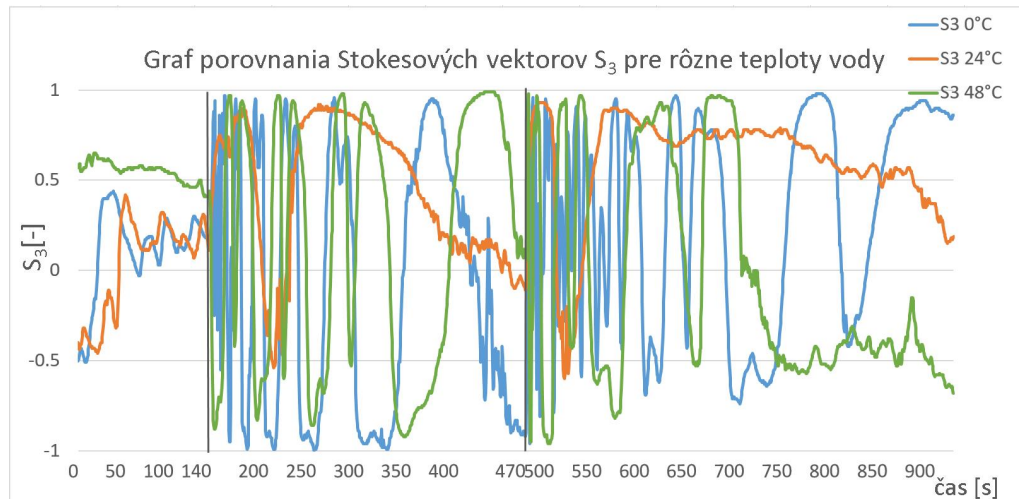


Obr. 7.2: Graf Stokesovho vektoru S_2 pri rôznych teplotách merania

7.3 Stokesov vektor S_3 pri rôznych teplotách merania

Dostávame sa k najpodstatnejšiemu grafu nášho merania, nakoľko sa sledovaný bod pohyboval primárne vo Stokesovom vektore S_3 . Odvodzujeme to z faktu, že hodnoty na y-ovej osi sa pohybujú v polovici meracieho času v rozmedzí ± 1 . Od odloženia kádinky (tzn. od 470 s merania) sa bod nedotahuje na spodnú hranicu, čo môže byť práve spôsobené faktom, že sa do polarimetru privádzalo len 10 % optického výkonu. Napriek tomu sledujeme pri všetkých meraniach oblúkovitý priebeh, niekedy aj sinusoidný priebeh, ktorý opisuje tvar kružnice. Po odložení kádinky je priebeh sledovaného bodu zrkadlovo otočený, bod sa vracia po podobnej trase ako po priložení kádinky.

Najmenšie zmeny sú opäť pri meraní s teplotou vody 24 °C, kde sledujeme zásadné zmeny len pri priložení a odstránení kádinky s vodou, inak je priebeh veľmi hladký a ustálený. Ďalšie dva priebehy si sú veľmi podobné, nesledujeme rozdiel sledovaného bodu pri rôznych teplotách ako pri Stokesových vektorech S_1 a S_2 . V čase pred priložením sa sledovaný bod pohybuje, pravdepodobne kvôli okolitým vplyvom, poprípade pohybe vlákna. V čase 140 s sledujeme v oboch prípadoch rýchle zmeny signálu, ktoré majú viac oblúkovité vrcholy ako pri predošlých grafoch. Po približne 200 s sa obidva priebehy ustálujú, priebeh už nie je taký úzky, čo sa opäť mení v čase 470 s, kde vidíme podobný priebeh ako pri priložení.

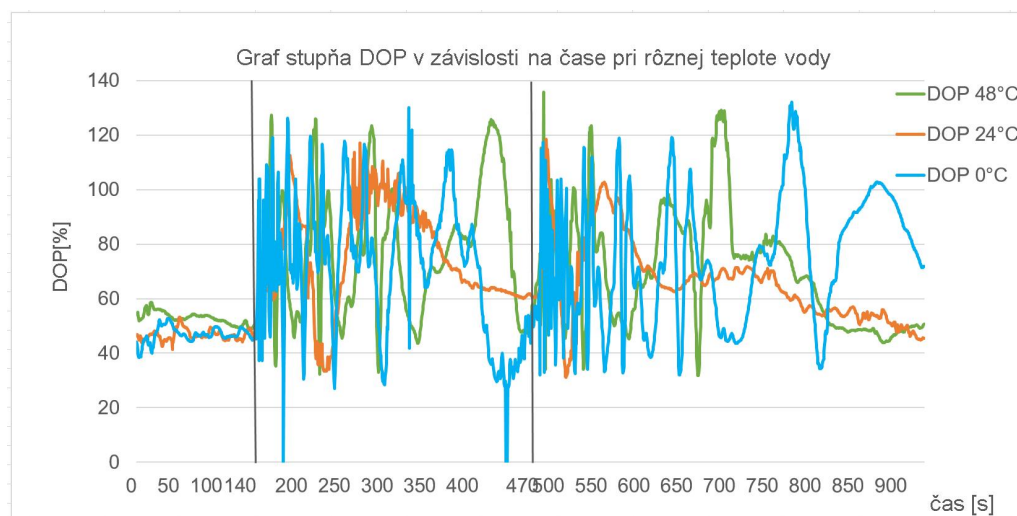


Obr. 7.3: Graf Stokesovho vektoru S_3 pri rôznych teplotách merania

7.4 DOP pri rôznych teplotách merania

Stupeň polarizácie DOP sa nám nepodarilo namerať podľa predstáv, nakoľko došlo k chybe merania pravdepodobne zlou kalibráciou polarimetru. Hodnoty dosahujú hodnoty nad 100 %, čo je samozrejme nezmysel, takže výsledky tohto merania nemôžeme považovať za dôveryhodné. Charakter priebehu je však podobný ako pri všetkých ostatných grafoch, na začiatku merania nesledujeme žiadne zmeny DOP, zmena nastáva opäť najskôr až po priložení kádinky, následne sa po čase DOP ustáľuje a zmeny nastávajú po odstránení kádinky, ktoré sa ku koncu merania ustáľujú.

Najväčšie zmeny sledujeme pri teplote 0 °C, najhladší priebeh má referenčné meranie.



Obr. 7.4: Graf DOP pre rôzne teploty vody

8 Záver

Cielom diplomovej práce je analýza spôsobu merania optického výkonu s dôrazom na známe metódy merania výkonu polarizovaného svetla šíriacim sa optickým vláknom dvoma polarizačnými rovinami. V semestrálnej práci bola popísaná teória k polarizácii svetla, PM vlákien, merania optického výkonu, Poincarého sféry a Stokesových parametrov. Pomocou poznatkov z teórie sme zostavili na praktickú časť zapojenie pre meranie polarizácie svetla v dvoch rôznych rovinách. Prvé navrhnuté zapojenie bolo riešené zapojením polarimetru, ktorý vyhodnocuje namerané výsledky a vykresluje ich do pripojeného počítača. Toto zapojenie je ale finančne dosť náročné, preto bol navrhnutý menej náročný návrh zapojenia s fotodiódou. V zapojení sa nachádza delič výkonu, ktorý delí výkon svetelného signálu v pomere 90 % do merača optického výkonu a 10 % do polarimetru.

V práci sa venujeme sledovaním zmeny chovania parametrov senzorického vlákna pri zmene teplotných podmienok v jeho okolí. Práca sa zaoberá možnosťami merania optického výkonu pre každú rovinu šírenia zvlášť. Súčasné meranie okamžitého stavu polarizácie umožnia získať potrebné informácie o nelineárnych javoch v optickom vlákne. V diplomovej práci sme sa venovali meraniu okamžitého stavu polarizácie, stupňa polarizácie, Stokesových parametrov a optického výkonu. Meranie bolo realizované pre tri rôzne teploty, inak boli všetky ostatné parametre (dĺžka merania, priloženie a odloženie kádinky v rovnakom čase, vlnová dĺžka) merania rovnaké. Namerané hodnoty sme vyniesli do grafov a popísali ich priebeh.

Na základe nameraných výsledkov môžeme vyvodiť záver, že senzorické vlákno reagovalo na zmeny teploty pri priložení kádinky s vodou okamžite. Vlákno taktiež reagovalo aj na okolité vplyvy (tlak, zmena teploty prostredia). Vhodnou aplikáciou nášeho navrhnutého zapojenia môže byť meranie a kontrola zmien teploty a tlaku v priestoroch, v ktorých môže veľkou zmenou teploty dôjsť k nežiaducim udalostiam. Veľkou výhodou zapojenia je, že senzorické vlákno funguje aj bez privedenia elektrického napájania, čo umožňuje meranie teploty a tlaku aj na miestach, kde by mohlo byť pri strete s elektrickým polom nebezpečné (ako je napr. v okolí vody).

Literatúra

- [1] *The Physics Classroom, Polarization* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-1/Polarization/>>.
- [2] *Matthew Schwartz, Polarization* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z URL: <scholar.harvard.edu/files/schwartz/files/lecture14-polarization.pdf>.
- [3] *Edmundoptics, Introduction to Polarization* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-polarization/>>.
- [4] COLLET, E: *Field guide to polarization* SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN 9780819458681.
- [5] *Edmundoptics, Introduction to Polarization* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/optics/introduction-to-polarization/>>.
- [6] Prof. Ing. FILKA, M., CSc. *Přenosová média*, Brno, Vysoké učení technické v Brně 2012 ISBN: 978-80-214-4444-7
- [7] *RP Photonics, Birefringence* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://www.rp-photonics.com/birefringence.html>>.
- [8] Fosco: *What are polarization maintaining fibers?* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<http://bit.ly/2hLiZ0U>>.
- [9] Kokyo: *Polarization crosstalk* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://en.symphotony.com/fiber-lasers/polarization-crosstalk/>>.
- [10] Newport: *Spun High and Low Birefringence Optical Fibers* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <<https://www.newport.com/f/spun-high-and-low-birefringence-fibers/>>.
- [11] RP Photonics encyclopedia *Polarization-maintaining Fibers* [online]. [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL: <https://www.rp-photonics.com/polarization_maintaining_fibers.html>.
- [12] COLLET, E: *Polarized Light in fiber optics*, SPIE New Jersey 2003, ISBN 9780819457615.

- [13] ŠIMÁK, Petr: *Vliv dvojlomu jednovídných optických vláken na činnost polarizačního multiplexu*, Brno, 2018. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [14] *The Stokes Polarization Parameters*, SPIE, the International society for optics and photonic, <https://spie.org/publications/fg05_p12-14_stokes_polarization_parameters?SS0=1/>.
- [15] *Measuring Power in Fiber Optics.FOA: Guide To Fiber Optics Premises Cabling* [online]. The Fiber Optic Association [cit. 2019-11-15]. Dostupné z URL:<<http://bit.ly/2zkK70F/>>.
- [16] KOLÁČKOVÁ, Aneta : *Optimalizace měření optického vlákna na výstupu vláknového senzoru teploty*. Brno, 2017. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [17] DRÁBEK, Jakub : *Měření parametrů polarizovaného světla na výstupu optovláknového senzoru*, Brno, 2018. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Prof. Ing. Miloslav Filka, CSc..
- [18] Thorlabs *CLD1010LP - Compact Laser Diode/Temperature Controller with TO Can Mount for Pin Codes A, D, E, and G* [online]. [cit. 2019-11-15], SpecSheet Dostupné z URL: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=CLD1010LP/>>.
- [19] Thorlabs *PAX5710IR2-T - TXP Polarimeter* [online]. [cit. 2019-11-15], SpecSheet Dostupné z URL: <<https://www.thorlabs.com/thorProduct.cfm?partNumber=PAX5710IR2-T/>>.
- [20] Thorlabs *ILP1550PM-FC - In-Line Fiber Polarizer, 1550* [online]. [cit. 2019-11-15], SpecSheet Dostupné z URL: <<https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=ILP1550PM-FC/>>.
- [21] mks|Ophir *Vega P/N 7z01560* [online]. [cit. 2019-11-15], SpecSheet Dostupné z URL: <<https://www.ophiropt.com/laser--measurement/laser-power-energy-meters/products/smart-displays/vega/>>.
- [22] FILKA, M., *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141
- [23] Kyselák, M., Dvořák, F., Maschke, J., Vlček, Č. *Sensitivity and dynamic phase response to thermal radiation of a polarization-maintaining fiber*. Optica Applicata, 2018, vol. vol. 48, no. 2, p. 249-261. ISSN 0078-5466.

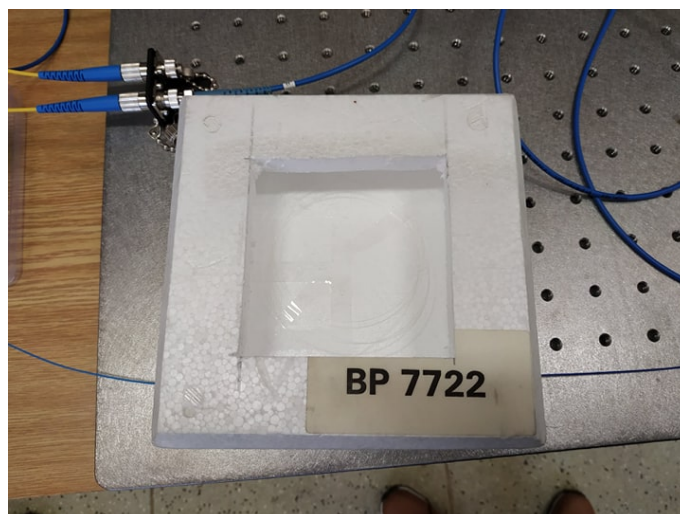
Zoznam symbolov, veličín a skratiek

\vec{B}	Vektor magnetickej indukcie
DOP	Stupeň polarizácie - Degree of polarization
\vec{E}	Vektor elektrickej intenzity
ϵ	Uhol elipticity
HIBI	Vláknó s veľkým dvojlomom-high-birefringence fiber
$I_{polarizované}$	Intenzita polarizovaného svetla
$I_{celkové}$	Celková intenzita svetla
$L + 45P$	<i>lineárne + 45°polarizované svetlo</i>
$L - 45P$	<i>lineárne - 45°polarizované svetlo</i>
LCD	Liquid crystal display
LCP	Ľavé kruhovo polarizované svetlo
LHP	Lineárne horizontálne polarizované svetlo
LoBI	Vláknó s malým dvojlomom-low-birefringence fiber
LVP	Lineárne vertikálne polarizované svetlo
n_2	Opticky hustejšie prostredie
n_1	Opticky redšie prostredie
PDL	straty pri polarizácii - Polarisation-dependent loss
PM	Vláknó zachovávajúce polarizáciu - Polarisation-maintaining fiber
RCP	Pravá kruhová polarizácia svetla
S_0	Prvý Stokesov parameter
S_1	Druhý Stokesov parameter
S_2	Tretí Stokesov parameter
S_3	Štvrtý Stokesov parameter
θ	Sférický uhol orientácie
x,y,z	Kartézsky súradnicový systém
δ	fázový rozdiel

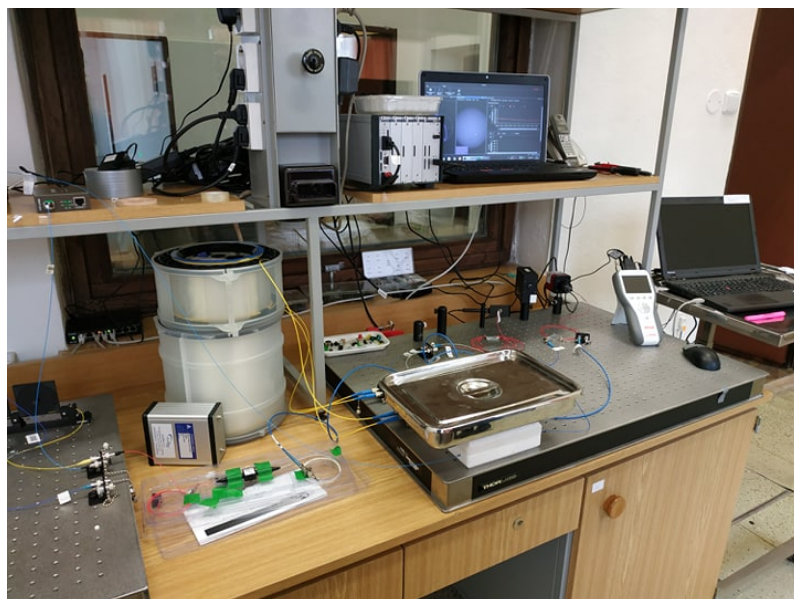
Zoznam príloh

A Fotky pracoviska	59
B Obsah priloženej elektronickej prílohy	60

A Fotky pracoviska



Obr. A.1: Uloženie optovláknového senzoru



Obr. A.2: Fotka pracoviska

B Obsah priloženej elektronickej prílohy

Priložená elektronická príloha obsahuje všetky podstatné súbory diplomovej práce. V zložke diplomová práca sa nachádza elektronická verzia diplomovej práce vo formáte PDF. V zložkách Meranie polarimeter a meranie optického merača výkonu obsahuje jednotlivé merania, ako aj grafy použité v diplomovej práci.